



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

선박 배기밸브의 리엔지니어링을 위한  
레이저 클래딩에 관한 기초 연구

A Fundamental Study on Laser Cladding for Re-engineering  
of Exhaust Valve for Marine Diesel Engine



지도교수 김 종 도

2016년 2월

한국해양대학교 대학원

기 관 공 학 과

이 은 진



본 논문을 이은진의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장 문 경 만 (인)

위 원 이 명 훈 (인)

위 원 김 중 도 (인)

2015년 12월 21일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	iii
List of Figures .....	iv
Abstract .....	x
 1. 서 론	
1.1 연구 배경 및 목적 .....	1
1.2 연구 내용 .....	7
 2. 이론적 배경	
2.1 클래딩 기술의 종류 및 특성 .....	9
2.1.1 클래딩 기술의 종류와 그 특징 .....	9
2.1.2 클래딩 재료의 종류 .....	18
2.2 레이저 클래딩의 이해 .....	24
2.2.1 레이저 클래딩의 메커니즘 .....	24
2.2.2 분말 공급 시스템의 원리 .....	31
2.2.3 레이저 클래딩의 특징 및 적용 .....	37
2.3 다이오드 레이저의 원리와 특성 .....	39
2.3.1 다이오드 레이저의 발진원리 .....	40
2.3.2 다이오드 레이저의 특성 .....	46
 3. 실험 방법	
3.1 실험 재료와 장치 .....	49
3.1.1 실험 재료 .....	49
3.1.2 실험 장치 .....	52
3.2 실험 및 분석 방법 .....	54
3.2.1 실험 방법 .....	54
3.2.2 분석 방법 .....	56

4. 실험결과 및 고찰	
4.1 1 패스 클래드 층의 특성에 미치는 공정변수의 영향	59
4.1.1 레이저 출력 및 빔 이송속도	59
4.1.2 분말 공급량	64
4.1.3 실드가스(Ar) 유량	66
4.1.4 이송가스(Ar) 유량	68
4.1.5 모재 표면 상태	72
4.2 멀티 패스 클래드 층의 특성에 미치는 공정변수의 영향	76
4.2.1 중첩률 기준의 정의에 대한 고찰	76
4.2.2 중첩률에 따른 클래드 층의 단면 형상 관찰	92
4.2.3 2층 적층 시 시작위치 변화 및 클래드 층 표면 온도에 따른 영향	95
4.2.4 적층 수의 증가에 따른 클래드 층의 단면 형상 관찰	107
4.3 클래드 층의 기계적 성질 및 조직특성 분석	113
4.3.1 1 패스 클래드 층의 경도분포	113
4.3.2 1 패스 클래드 층의 미세 및 성분분석	116
4.3.3 멀티 패스 클래드 층의 경도분포	129
4.3.4 멀티 패스 클래드 층의 미세조직 및 성분분석	135
4.4 분말 종류에 따른 코팅 층의 특성 비교	150
4.4.1 LC-190 클래드 층의 공정변수에 따른 단면형상 및 경도분포	150
4.4.2 Stellite 6과 LC-190 클래드 층의 형상 비교	163
5. 결 론	166
참고 문헌	169
감사의 글	174

## List of Tables

<b>Table 1.1</b> Ranking of order backlog by world shipbuilding yard group .....	4
<b>Table 2.1</b> Specification of overlay welding methods .....	13
<b>Table 2.2</b> Characteristics of different thermal spraying process .....	17
<b>Table 2.3</b> Chemical composition, properties and applications to different types of stellite .....	23
<b>Table 2.4</b> Comparison between laser cladding and other coating technique .....	38
<b>Table 2.5</b> Wavelength of a selected range of diode laser materials .....	48
<b>Table 3.1</b> Chemical composition of SNCrW .....	50
<b>Table 3.2</b> Physical constants and tensile strength of SNCrW .....	50
<b>Table 3.3</b> Chemical composition and mechanical properties of EuTroLoy 16006 ...	50
<b>Table 3.4</b> Chemical composition and mechanical property of LC-190 .....	50
<b>Table 3.5</b> Specification of HPDL .....	53
<b>Table 4.1</b> A summary of the effect of an increase in various process variables on the clad geometry and its properties .....	60

## List of Figures

Fig. 1.1 Process parameters of input and output by laser cladding .....	5
Fig. 1.2 Application of laser cladding process .....	5
Fig. 1.3 Photo of exhaust valve for marine diesel engine .....	6
Fig. 1.4 Photos of exhaust valve face with stellite 6 coating by PTA process ....	6
Fig. 2.1 Schematic diagram of the PTA cladding process .....	14
Fig. 2.2 Different microstructure of laser alloying, glazing and cladding .....	14
Fig. 2.3 Schematic diagram of the different thermal spraying process .....	16
Fig. 2.4 Principle of the VPS .....	16
Fig. 2.5 Schematic illustration of laser cladding process by powder injection ....	28
Fig. 2.6 Illustration of the melting process of the laser cladding powder which was being irradiated by the laser beam .....	29
Fig. 2.7 Schematic illustration of the dilution process .....	29
Fig. 2.8 Different methods of laser cladding .....	30
Fig. 2.9 Schematic illustration of laser cladding by pre-placed powder : (a) Illustrates how the molten coating contracts when irradiated by the laser source, (b) Illustrates how contraction exposes the substrate increasing dilution in the adjacent coating .....	30
Fig. 2.10 Schematics of gravity-based powder feeder .....	32
Fig. 2.11 A schematic of mechanical wheel powder feeder .....	33
Fig. 2.12 A schematic of typical fluidized-bed powder feeder .....	33
Fig. 2.13 A schematic of vibratory-based powder feeder .....	33
Fig. 2.14 Principle of off-axis cladding .....	35
Fig. 2.15 Principle of two different off-axis cladding methods : (a) Illustrate of dragging injection, (b) Illustrate of stinging injection .....	35
Fig. 2.16 Simplified schematic of a coaxial powder injection nozzle; $\beta$ : apex angle of nozzle, $f_p$ : distance between nozzle tip and powder stream focus, $d_p$ : diameter of powder stream focus, $\ell$ : distance between nozzle tip and workpiece ...	36

Fig. 2.17 Influence of slit size on the core diameter of the powder stream focus of a coaxial powder injection nozzle, Fe-based powder, 50~150 $\mu\text{m}$ ...	36
Fig. 2.18 Powder stream focus of two different particle sizes, Ni-based powder ...	36
Fig. 2.19 Energy bands of P and N type semiconductor : (a) Separated P-type and N-type semiconductor, (b) The band structure and spatially fixed space-charge(indicated by + and -) in the P-N junction region .....	42
Fig. 2.20 Mechanism of P-N junction diode laser .....	43
Fig. 2.21 Characteristic of diode laser power output by input current .....	44
Fig. 2.22 Typical broad-area P-N homojunction laser .....	44
Fig. 2.23 Comparison of laser oscillation mechanism with diode and general laser ...	45
Fig. 2.24 Variation of wavelength according to oscillator power .....	45
Fig. 2.25 Beam divergence and intensity distribution of diode laser .....	48
Fig. 2.26 Comparison of cost of the laser cladding of aluminium with different laser .....	48
Fig. 3.1 Appearance and dimension of substrate .....	51
Fig. 3.2 Shape of as-received powder for laser cladding .....	51
Fig. 3.3 Setup of experimental equipment in laser cladding .....	53
Fig. 3.4 Schematic of laser cladding and laser beam shape .....	55
Fig. 3.5 Photos of clad layers .....	55
Fig. 3.6 Position of sampling for observing cross section .....	57
Fig. 3.7 Sampling of clad layer .....	58
Fig. 3.8 Measurement position for hardness test .....	58
Fig. 4.1 Surface and cross section of clad with laser power in $v = 2 \text{ mm/s}$ .....	61
Fig. 4.2 Variation of clad characteristics of Fig. 4.1 .....	61
Fig. 4.3 Surface and cross section of clad with laser power in $v = 4 \text{ mm/s}$ .....	62
Fig. 4.4 Variation of clad characteristics of Fig. 4.3 .....	62
Fig. 4.5 Surface and cross section of clad with laser power in $v = 6 \text{ mm/s}$ .....	63
Fig. 4.6 Variation of clad characteristics of Fig. 4.5 .....	63
Fig. 4.7 Surface and cross section of clad with powder feed rate .....	65
Fig. 4.8 Variation of clad characteristics of Fig. 4.7 .....	65
Fig. 4.9 Surface and cross section of clad with shield gas flow rate .....	67
Fig. 4.10 Variation of clad characteristics of Fig. 4.9 .....	67

Fig. 4.11 Surface and cross section of clad with carrier gas flow rate .....	70
Fig. 4.12 Variation of clad characteristics of Fig. 4.11 .....	70
Fig. 4.13 Variation of clad with carrier gas flow rate in laser cladding .....	71
Fig. 4.14 Surface reflectivity and roughness of substrate before and after sand blasting .....	73
Fig. 4.15 Multiple reflections of laser light incident on an optically rough surface ...	73
Fig. 4.16 Surface and cross section of clad with substrate surface condition( $P = 3$ kW) ...	74
Fig. 4.17 Variation of clad characteristics of Fig. 4.16 .....	74
Fig. 4.18 Surface and cross section of clad with substrate surface condition( $P = 4$ kW) ..	75
Fig. 4.19 Variation of clad characteristics of Fig. 4.18 .....	75
Fig. 4.20 The definition of overlapping ratio with different criterion .....	78
Fig. 4.21 Schematic diagram of different overlapping ratio by beam size criterion ..	79
Fig. 4.22 Surface and cross section of multi-pass clad with overlapping ratio by beam size criterion .....	80
Fig. 4.23 Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.22 .....	80
Fig. 4.24 Schematic diagram of different overlapping ratio by clad layer width criterion .....	81
Fig. 4.25 Surface and cross section of multi-pass clad with overlapping ratio by clad layer width criterion .....	82
Fig. 4.26 Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.25 .....	82
Fig. 4.27 Variation of hardness at 20 % overlapping ratio by beam size criterion ..	86
Fig. 4.28 Variation of hardness at 30 % overlapping ratio by clad layer width criterion .....	87
Fig. 4.29 Cross section and schematic diagram of multi-pass cladding at 20 % overlapping ratio by beam size criterion .....	88
Fig. 4.30 Results of EDS analysis on a, b, c and d position in Fig. 4.29 .....	88
Fig. 4.31 Results of EDS analysis on e, f, g and h position in Fig. 4.29 .....	89
Fig. 4.32 Cross section and schematic diagram of multi-pass cladding at 30 % overlapping ratio by clad layer width criterion .....	90
Fig. 4.33 Results of EDS analysis on a, b, c and d position in Fig. 4.32 .....	90
Fig. 4.34 Results of EDS analysis on e, f and g position and hardness of g position in Fig. 4.32 .....	91

<b>Fig. 4.35</b> Surface and cross section of multi-pass clad with overlapping ratio ( $R_f = 5 \text{ rpm}(32\sim33 \text{ g/min})$ ) .....	94
<b>Fig. 4.36</b> Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.35 .....	94
<b>Fig. 4.37</b> Inter-run porosity between adjacent clad layers .....	94
<b>Fig. 4.38</b> Schematic diagram of different cladding head position in multi-layer laser cladding .....	97
<b>Fig. 4.39</b> Surface and cross section of multi-pass clad with different cladding head position in multi-layer laser cladding .....	98
<b>Fig. 4.40</b> Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.39 .....	98
<b>Fig. 4.41</b> Variation of hardness with different cladding head position in multi-layer laser cladding .....	99
<b>Fig. 4.42</b> Results of EDS lining analysis along the cross section of multi-layer clad when moving distance of cladding head is 0 mm and 2.7 mm in laser cladding .....	100
<b>Fig. 4.43</b> Variation of clad characteristics with different 1st layer surface temperature in 2nd layer cladding( $O_{Lap,r} = 10 \%$ ) .....	103
<b>Fig. 4.44</b> Variation of clad characteristics with different 1st layer surface temperature in 2nd layer cladding( $O_{Lap,r} = 20 \%$ ) .....	103
<b>Fig. 4.45</b> Hardness distribution of clad layer with different 1st layer surface temperature in 2nd layer cladding( $O_{Lap,r} = 10 \%$ ) .....	104
<b>Fig. 4.46</b> Hardness distribution of clad layer with different 1st layer surface temperature in 2nd layer cladding( $O_{Lap,r} = 20 \%$ ) .....	105
<b>Fig. 4.47</b> Results of EDS lining analysis along the cross section of 2nd layer clad with different 1st layer surface temperature .....	106
<b>Fig. 4.48</b> Schematic diagram of different layer number in multi-layer laser cladding ..	109
<b>Fig. 4.49</b> Variation of clad characteristics with different layer number in multi- layer laser cladding( $R_f = 3 \text{ rpm}(19\sim20 \text{ g/min})$ ) .....	110
<b>Fig. 4.50</b> Variation of clad characteristics with different layer number in multi- layer laser cladding( $R_f = 4 \text{ rpm}(26\sim27 \text{ g/min})$ ) .....	111
<b>Fig. 4.51</b> Variation of clad characteristics with different layer number in multi- layer laser cladding( $R_f = 5 \text{ rpm}(32\sim33 \text{ g/min})$ ) .....	112
<b>Fig. 4.52</b> Variation of dilution ratio and hardness with laser power .....	114



Fig. 4.53	Variation of dilution ratio and hardness with traveling speed .....	115
Fig. 4.54	Variation of dilution ratio and hardness with powder feed rate .....	115
Fig. 4.55	Microstructure of clad with laser power in laser cladding .....	118
Fig. 4.56	Cross section and microstructure observed by OM and SEM in clad layer ..	119
Fig. 4.57	Morphology and measurement of dendrite arm spacing .....	120
Fig. 4.58	OM and SEM images of near surface zone on one-pass clad layer ..	124
Fig. 4.59	Results of EDS analysis of near surface zone on one-pass clad layer ...	124
Fig. 4.60	OM and SEM images of around center zone on one-pass clad layer ..	125
Fig. 4.61	Results of EDS analysis of around center zone on one-pass clad layer ...	125
Fig. 4.62	OM and SEM images of near interface zone on one-pass clad layer ..	126
Fig. 4.63	Results of EDS analysis of near interface zone on one-pass clad layer ..	126
Fig. 4.64	Results of EDS lining analysis along the cross section of clad with laser power in laser cladding .....	127
Fig. 4.65	Results of EDS lining analysis along the cross section of clad with powder feed rate in laser cladding .....	128
Fig. 4.66	Longitudinal hardness distribution of 2nd layer at 20 % overlapping ratio ..	130
Fig. 4.67	Longitudinal hardness distribution of 5th layer at 20 % overlapping ratio ...	131
Fig. 4.68	Transverse hardness distribution of 1st layer at 10 % overlapping ratio ..	133
Fig. 4.69	Transverse hardness distribution of 1st layer at 20 % overlapping ratio ..	133
Fig. 4.70	Transverse hardness distribution of 2nd layer at 10 % overlapping ratio ..	134
Fig. 4.71	Transverse hardness distribution of 2nd layer at 20 % overlapping ratio ..	134
Fig. 4.72	Cross section and microstructure in multi-pass clad layer .....	137
Fig. 4.73	Cross section and microstructure in 2nd layer & multi-pass clad layer ...	138
Fig. 4.74	Results of EDS lining analysis along the cross section of 2nd layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio .....	143
Fig. 4.75	Results of EDS lining analysis along the cross section of 5th layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio .....	144
Fig. 4.76	Results of EPMA on cross section of multi-pass clad at 20 % overlapping ratio .....	145
Fig. 4.77	To be continued .....	146
Fig. 4.78	Results of EPMA on cross section of 2nd layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio .....	147

<b>Fig. 4.79</b> Results of EPMA on cross section of 3rd layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio .....	148
<b>Fig. 4.80</b> To be continued .....	149
<b>Fig. 4.81</b> Surface and cross section of LC-190 clad with laser power .....	154
<b>Fig. 4.82</b> Variation of clad characteristics of Fig. 4.81 .....	154
<b>Fig. 4.83</b> Schematic of changes in temperature and stress during laser cladding ..	155
<b>Fig. 4.84</b> Surface and cross section of LC-190 clad with preheating temperature ..	156
<b>Fig. 4.85</b> Variation of clad characteristics of Fig. 4.84 .....	156
<b>Fig. 4.86</b> Surface and cross section of LC-190 clad with laser power after preheating substrate to 300 °C .....	157
<b>Fig. 4.87</b> Variation of clad characteristics of Fig. 4.86 .....	157
<b>Fig. 4.88</b> Surface and cross section of LC-190 clad with powder feed rate after preheating substrate to 300 °C .....	158
<b>Fig. 4.89</b> Variation of clad characteristics of Fig. 4.88 .....	158
<b>Fig. 4.90</b> Variation of LC-190 multi-pass clad characteristics of 10 % and 20 % overlapping ratio in laser cladding .....	159
<b>Fig. 4.91</b> Variation of dilution ratio and hardness with laser power after preheating substrate to 300 °C .....	161
<b>Fig. 4.92</b> Variation of dilution ratio and hardness with powder feed rate after preheating substrate to 300 °C .....	162
<b>Fig. 4.93</b> Transverse hardness distribution of LC-190 multi-pass clad at 20 % overlapping ratio .....	162
<b>Fig. 4.94</b> Comparison of LC-190 clad layer area with laser power under non- preheating and after preheating substrate to 300 °C .....	165
<b>Fig. 4.95</b> Comparison of stellite 6 and LC-190 clad layer area with laser power when LC-190 cladding is done after preheating substrate to 300 °C ..	165

# **A fundamental study on laser cladding for re-engineering of exhaust valve for marine diesel engine**

Lee, Eun Jin

Department of Marine Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## **Abstract**

Materials used in modern industry are commonly exposed to very aggressive environments such as high temperatures, extreme wear condition or high mechanical stresses, etc.. So, Cladding is applicable to many kinds of components. This process is widely used for improving the surface and near surface properties such as wear and corrosion resistance of a part or to re-surface a component that has become worn through use. Also, It involves the creation of a new surface layer on top of a base metal. Most traditional cladding can be divided into two-types technique, arc welding and thermal spraying. These are have its own advantages and drawbacks. But compared to with conventional surface technique including TIG welding, SAW, PTA and thermal spraying, laser cladding has some distinct advantages related to coating quality and process. Laser cladding is an advanced hard-facing process producing thick coating with metallurgical bond to the substrate and one of the industrial preferred surface engineering techniques for its ability to apply a

chemically different materials as a layer onto a given substrate. Laser cladding combines the features and improves the drawbacks of existing techniques. It can produce denser coatings with little or no porosity, minimal dilution, minimal distortion of the workpiece, reduced heat affected zone, better surface quality, simplicity to automate and reduction in processing times. Furthermore, high power diode laser used for this process is the most proper laser source due to the higher efficiency, the larger absorption of the powder in the specific wavelength of the radiation emitted by the diode laser and the lower price.

This study is related to develop fundamental technologies on laser cladding for repairing of marine diesel engine exhaust valve. Stellite 6 powder injection laser cladding was conducted on heat resisting steel SNCrW substrate by using diode laser. The powder can be blown by carrier gas through coaxial nozzle.

The laser power, beam traveling speed, powder feed rate, overlapping ratio and layer number were regarded as dominant parameters, and the criterion of overlapping ratio was defined as beam size between width of clad layer and beam size by experiments. The effects of process parameters were studied by observing the geometry of clad and measuring the width, height and dilution ratio of clad layer. The heat input was proportion to width and dilution ratio of clad layer and inverse proportion to height and hardness. Hardness was measured in the longitudinal and transverse direction, EDS and EPMA on cross section of 1st, 2nd and 3rd layer & multi-pass clad was carried out to investigate characteristics of clad with various parameters.

**KEY WORDS:** Laser cladding 레이저 클래딩;  
Stellite 6 스텔라이트 6;  
Process parameters 공정변수.

# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경 및 목적

최근 심각한 환경오염에 따른 환경보호 활동의 일환으로 자원이나 도구 및 제품의 재활용과 재사용에 대한 관심이 꾸준히 증가하고 있다. 따라서 이미 사용 중이거나 수명이 다한 제품을 수리하여 다시 사용 가능하도록 하는 제품의 개발이 많이 이루어지고 있다. 또한, 현재 여러 나라에서 겪고 있는 경제적 어려움으로 인해 실제로 산업현장에서도 새로운 기기를 사는 대신 수리(repairing) 및 보수(renovating), 재건설(regenerating)을 통해 비용을 절감하려고 한다. 이와 같은 사회 패러다임의 변화와 어려운 경제적 상황으로 인해 수리와 리퍼비시먼트(refurbishment, 불량품이나 중고 제품을 신상품 수준으로 정비해 다시 내놓는 제품) 시장이 거대해짐으로써 리엔지니어링에 대한 관심 또한 증가하게 되었다<sup>1-3)</sup>. 리엔지니어링은 이미 완공 및 건설 혹은 건조가 끝난 구조물이나 시설 및 선박 등을 개보수하는 것을 의미하는 것으로 산업화 이후 꾸준히 이루어지고 있는 산업의 한 분야이다. 선진 산업국에서는 리엔지니어링에 대한 수요가 꾸준히 발생해 왔기에 2000년 초반부터 이미 기반시설 및 설비투자가 완료되어 현재는 보다 고도화되고 전문화되어지고 있다. 조선분야 역시 1912년 디젤엔진의 도입을 시작으로 리엔지니어링의 역사가 매우 깊다.

국내는 조선해양산업의 인프라 규모와 기술면에서 세계 조선해양산업을 선도하고 있다. 하지만 중국이 자국 업체들의 선박 건조를 몰아주면서 2006년부터 세계 조선해양산업 시장의 최대 점유국으로 수주량 1위를 기록했다. 중국의 선박 수주는 대부분 기술력이 높지 않아도 건조할 수 있는 벌크선 위주인 반면, 한국은 건조 시 높은 기술력을 요하는 초대형 컨테이너선, LNG·LPG선, 해양플랜트(offshore) 등 고부가가치 선박 기준으로 가장 우월한 상황이며 조선소 인프라 수준과 설계 및 시공 기술에서 압도적이다. 따라서 2014년 건조량에서 한국이 중국을 추월할 수 있었으며 Table 1.1의 2015년 1월 말 클락슨 연구 서비스(Clarkson research services)를 통해 한국이 여전히 수준잔량(CGT, compensated gross

tonnage) 1위 자리를 유지하는 것을 알 수 있다. 이와 같이 국내 조선 산업의 위상은 매우 높으나 그에 비해 선박의 보수 및 수리산업의 기술력 및 인지도는 떨어진다. 선박 수리 산업은 고도화된 기술력을 바탕으로 노동력과 장비가 뒷받침되어야 하며 자재비의 비중이 상대적으로 적고 인력의 비중이 조선 산업에 비하여 높은 편이다. 수리 조선 산업의 경쟁력은 임금수준, 기술, 입지여건 등 3대 요인에 의해 결정되며 국내의 경우 경쟁국인 중국에 비해 높은 임금수준으로 가격경쟁력이 떨어진다. 실제로 선박의 보수 및 수리에서 가장 비중 있는 기술은 용접으로 중국의 경우 용접비용이 톤당 1,100달러인 반면 국내에서는 4,000달러로 거의 4배 수준이다. 또한 낮은 노동 장비율(생산과정에서의 종사자 1인당 장비 사용 수준)로 생산성 저하와, 오래 전문 인력 양성 기간 및 높은 작업 위험률로 기피업종으로 인식되어 인력부족현상이 지속되어 왔다. 그리고 수리조선 기반시설의 미흡 및 선박수리용 부품에 대한 관세부과의 부담 등으로 발전에 제약을 받고 있으며 그로 인해 기술력 및 인지도가 떨어지는 문제점이 있다. 따라서 정부는 수리조선 기반시설 및 인력확충, 세제 지원과 설비투자 확대로 정책지원을 하고 있는 가운데 무엇보다도 가격 경쟁력 향상을 위한 기술 축적이 시급한 상황이다. 국내 선박 보수 및 부품 엔지니어링 기업에서는 기술력 확보를 위해 노력하고 있으나 기술을 협업 및 제공하던 일본 기업들의 경쟁력 위축 및 위기의식에 따른 기술협업 불협화음 발생 및 고급인력의 유입실패 등으로 상황이 개선되지 못하고 있다<sup>4-7)</sup>. 이러한 상황을 개선하기 위해서는 기술 경쟁력 및 시장 확대의 돌파구로써 합금이 사용되는 부품의 수리 및 보수에 중점을 두어야 한다.

기존의 오버레이 용접과 용사 기술은 선급에서 승인을 받아 사용되고 있지만 여러 문제점이 있다. 아크 용접의 경우 제품에 입열량이 높아 상대적으로 희석이 많이 되며, 제품의 기계적 변형이 일어나 후가공이 추가적으로 필요하게 된다. 용사 기술을 적용하게 되면 클래드 층과 모재간의 결합력이 높지 않아 접착 및 내마모성의 문제로 이어질 수 있으며, 코팅 층 내부에 기공이 발생할 수 있다. 또한 고합금 재료를 사용하여 기존 방법으로 수리 시 까다로운 공정변수, 긴 작업 시간, 높은 단가와 같은 문제점이 발생하기 때문에 기술 개발의 일환으로 레이저 클래딩(laser cladding)을 고려할 필요가 있다<sup>1,2,8-10)</sup>.

레이저 클래딩은 기지금속 표면에 내마모성 및 내식성과 같은 필요한 성질을



부여하기 위하여 이중금속을 금속 표면에 부가하면서 레이저 빔을 이용하여 두 재질을 용융시켜 접합하는 기술로 모재 자체의 기본적인 성질은 유지하면서 외부의 격렬한 환경에 견딜 수 있는 표면층을 형성할 수 있다. 모재와 클래드 층의 결합력은 우수하며, 제품의 입열량이 적어 열 변형이 거의 발생하지 않기 때문에 후가공 또한 필요하지 않게 된다. 기존 기술보다 모재 희석이 낮고 결함이 거의 존재하지 않는 우수한 클래드 층을 형성하므로 가공품의 품질과 내구성을 향상시킬 수 있다. 그리고 저가의 모재에 레이저 클래딩 시 귀금속 합금, 금속 및 기타 고가의 물질을 절약할 수 있고 따라서 제조비용을 크게 절감할 수 있다. 레이저 클래딩은 레이저 조사와 클래딩 재료 공급의 복합 공정으로 Fig. 1.1에 나타내듯이 고려될 수 있는 공정변수는 크게 레이저와 재료, 이동 장치 및 분말 공급 장치, 주변 조건으로 분류할 수 있으며, 이에 따라 형성되는 클래드 층 특성이 달라진다. 그러므로 적절한 클래드 층을 형성하기 위해서는 공정변수가 클래드 층의 특성에 미치는 영향을 파악하여야 한다<sup>1,2,8-12</sup>.

선박용 주기 부품 중 클래딩이 필요한 부품으로는 크랭크샤프트 저널, 피스톤 크라운의 링 그루브와 터빈 블레이드, 배기밸브의 밸브 페이스와 밸브 시트 등이 있으며 Fig. 1.2와 같이 수리를 위해 레이저 클래딩이 적용되고 있다. 이 중 엔진의 고성능·고출력화, 저연비화, 메인テナンス 프리(maintenance free)화에 따라 엔진의 부하가 증대되면서 밸브 페이스와 시트가 엔진 성능에 영향을 미치는 중요한 요소 중 하나가 되었다. Fig. 1.3에 나타내듯이 디젤 및 가솔린 엔진에서 밸브 페이스와 시트는 연소가스를 밀봉하는 역할로, 약 500~800 ℃의 고온에서 높은 빈도의 충격과 고온 배기가스에 의한 침식이 발생한다. 현재 산업 현장에서는 배기 밸브 시트 및 페이스에 표면층을 형성하기 위해 PTA 용접을 적용하고 있으며, Fig. 1.4는 MAN B&W 35MC 엔진의 배기밸브 페이스부에 PTA 육성용접 후 표면을 재가공했을 때의 표면 및 단면 사진으로 열영향부 면적이 상당하였다. 이와 달리 기존의 기술보다 더 발전한 레이저 클래딩을 적용하면 고온에서의 내마모성, 피로 강도 및 내식성이 더욱 개선되고 열 영향도 최소화하여 운전 시간 증가 및 정비성의 향상으로 이어질 수 있다<sup>1,3,13</sup>.

현재까지 국내 레이저 클래딩 기술의 적용사례 및 연구는 부족한 상황이므로 기초기술의 확보가 우선적으로 선행될 필요가 있다. 따라서 본 연구는 내마모성이

요구되는 배기밸브 페이스에 레이저 클래딩을 적용하고자 실제 배기밸브 소재와 클래딩 분말을 사용하여 1 패스(one-pass) 클래드 층의 특성에 미치는 공정변수의 영향을 파악한 뒤, 실제품에 적용하기 위한 중첩 및 적층 실험을 실시하여 선박용 엔진 부품의 리엔지니어링을 위한 기초기술 연구를 진행하였다.

**Table 1.1** Ranking of order backlog by world shipbuilding yard group

Ranking	Shipbuilding yard	No. of shipyard	Order backlog(CGT)	Country
1	Hyundai Heavy Industries	3	9,640,000	Korea
2	Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd.	2	8,639,000	Korea
3	Imabari Shipbuilding	8	5,142,000	Japan
4	Samsung Heavy Industries	2	5,136,000	Korea
5	Hyundai Mipo Dockyard Co., Ltd.	2	4,036,000	Korea
6	STX Offshore & Shipbuilding	4	3,570,000	Korea
7	Japan Marine United	6	3,379,000	Japan
8	Yangzijiang Shipbuilding	2	2,885,000	China
9	Shanghai Waigaoqiao Shipbuilding	2	2,787,000	China
10	Hudong Zhonghua Shipbuilding	2	2,697,000	China

\*\* Data source : Clarkson Research Service(2015. 1.)



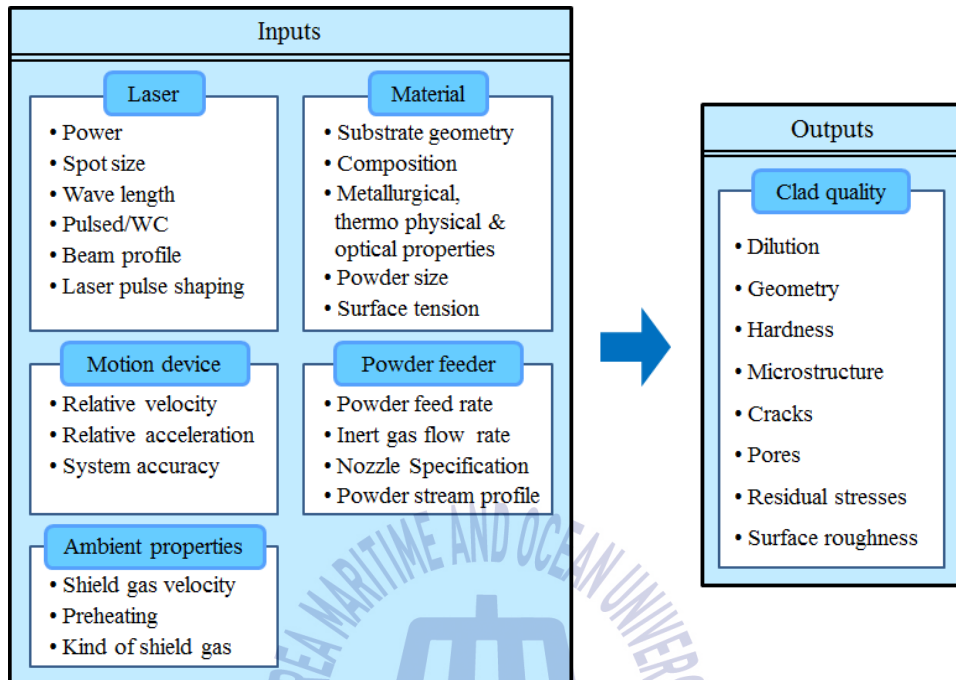


Fig. 1.1 Process parameters of input and output by laser cladding

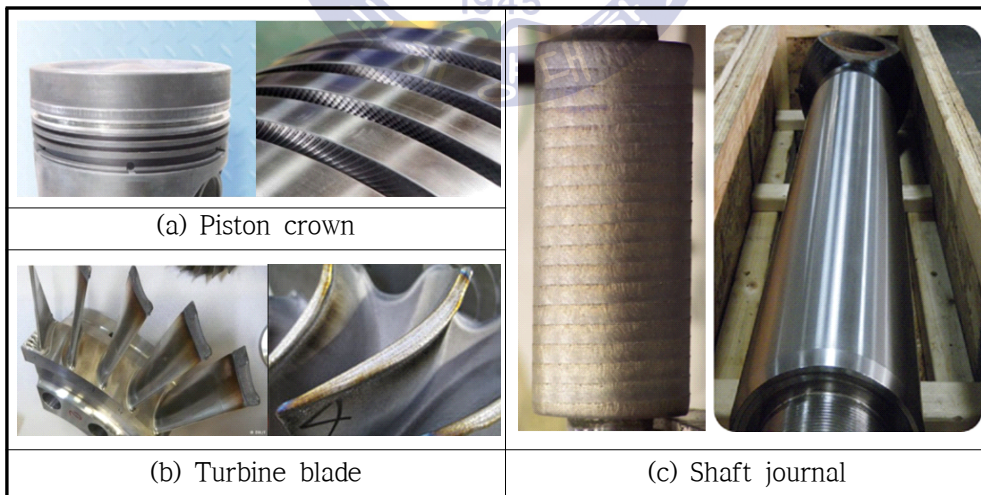


Fig. 1.2 Application of laser cladding process

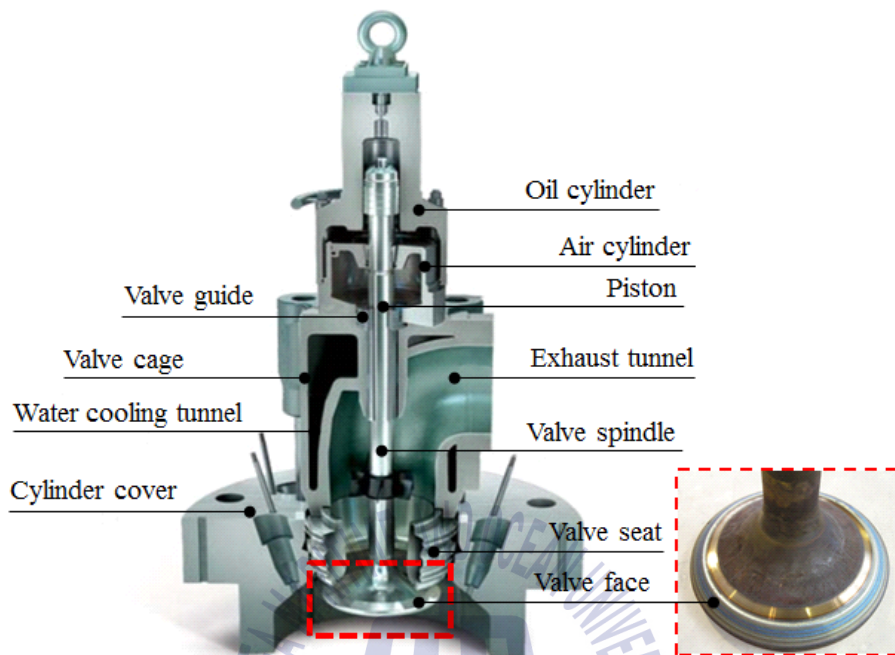


Fig. 1.3 Photo of exhaust valve for marine diesel engine

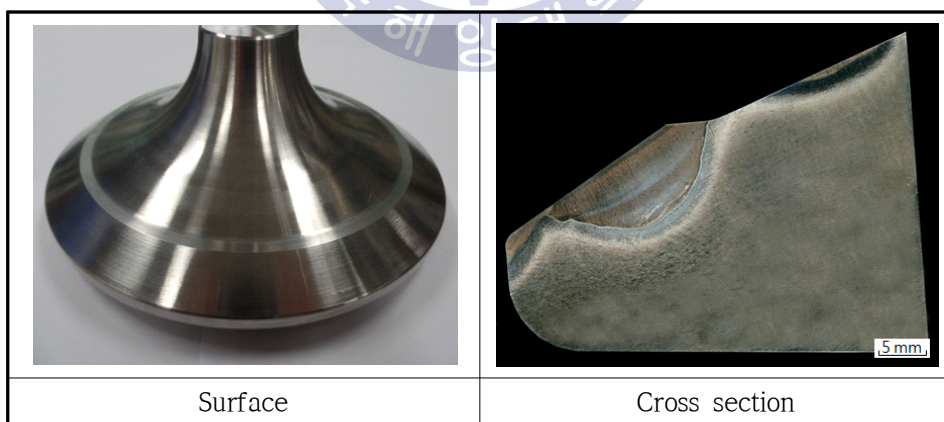


Fig. 1.4 Photos of exhaust valve face with stellite 6 coating by PTA process

## 1.2 연구 내용

레이저 클래딩은 많은 장점을 가지고 있지만 빔 사이즈 특성상 넓은 면적에 높은 높이의 클래드 층을 형성하기 위해서는 클래드 층의 중첩과 적층이 필요하다. 그러나 공정변수가 적절하지 않으면 클래드 층 내부에 기공이나 균열과 같은 결함이 발생할 수 있으며 레이저 클래딩의 장점 중 하나인 희석률이 증가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 선박용 배기밸브 소재인 내열강 SNCrW와 Co계 합금 분말을 이용하여 공정변수에 따른 1 패스(one-pass) 클래드 층의 특성을 조사하였고 이 결과를 토대로 중첩 및 적층 실험을 진행하여 멀티 패스(multi-pass) 클래드 층을 형성하였다. 본 연구의 세부내용을 정리하면 다음과 같다.

### (1) 1 패스 클래드 층의 특성에 미치는 공정변수의 영향

레이저 클래딩 시 주된 공정변수인 레이저 출력(laser power,  $P$ ), 빔 이송속도(beam traveling speed,  $v$ ) 및 분말 공급량(powder feed rate,  $R_p$ )을 변화시키면서 1 패스 클래드 층의 형상 및 폭과 높이, 희석률 특성을 파악하였다. 실드가스(shield gas,  $G_s$ ) 및 이송가스(carrier gas,  $G_c$ )의 유량에 따른 클래드 층 외관 및 횡단면에 미치는 영향을 조사하여 최적 조건을 도출하였다.

### (2) 멀티 패스 클래드 층의 특성에 미치는 공정변수의 정의 및 영향

중첩률 기준을 빔 사이즈일 때와 클래드 층의 폭 길이일 때로 나누어, 멀티 패스 클래드 층의 형상, 경도 및 합금 원소의 농도 분포를 비교·분석하여 중첩률 기준을 정의하였다. 중첩률에 따른 클래드 층의 폭과 높이 변화와 발생하는 결함에 대해 파악하였다. 2층 적층 시, 레이저 조사 시작 위치와 1층 클래드 층의 표면 온도를 변화시켰을 때 클래드 층 특성을 비교하여 적층 방법을 한 가지로 정하였으며, 적층 수가 증가할수록 클래드 층 단면에 나타나는 형상 변화에 대해 알아보았다.

### (3) 1 패스 및 멀티 패스 클래드 층의 공정변수에 따른 경도 분포

재료의 입열량에 영향을 미치는 공정변수에 따라 클래드 층의 희석률이 변하였으며 이러한 영향은 경도 분포에서도 그대로 나타날 것으로 판단된다. 출력, 빔 이송속도

또는 분말 공급량을 변화시켜 1 패스 클래드 층의 희석률과 경도 분포를 비교하였다. 또한 멀티 패스 클래드 층에서도 중첩부에 재용융 및 재응고에 따른 경도 분포 변화를 확인하였으며 중첩률에 따른 평균 경도 값을 비교하였다

#### (4) 클래드 층의 부위별 조직 및 성분분석

출력 및 분말 공급량에 따라 입열량이 다르기 때문에 클래드 층의 조직도 달라진다. 따라서 1 패스 클래드 층의 미세조직을 비교·분석하기 위하여 광학 현미경과 주사전자현미경을 이용하였으며, EDS를 사용하여 성분 분포 차이를 확인하였다. 중첩 및 적층 시 재용융 및 재응고가 발생하는 영역의 조직 특성 변화를 관찰하였으며 EDS 라인 분석을 통해 클래드 층 위치 별 희석정도를 비교하였다. 정밀 분석을 위해 EPMA를 이용하여 중첩부와 적층부의 성분 변화를 확인하였다.

#### (5) 분말 종류에 따른 클래드 층의 특성

LC-190으로 분말 종류를 달리하여 레이저 클래딩 시 주요 공정변수에 의한 클래드 층의 특성을 파악하였다. stellite 6와 LC-190은 동일한 Co계 분말일지라도 W와 C의 합금 성분비가 다르며 그로 인해 용적밀도 또한 변하기 때문에 분말 종류에 따른 클래드 층의 특성을 검토하였다.

## 제 2 장 이론적 배경

### 2.1 클래딩 기술의 종류 및 특성

#### 2.1.1 클래딩 기술의 종류와 그 특징

대부분의 재료 또는 구조물에는 실제적인 표면처리가 필요하며 이를 통해 매우 효과적으로 내식성 및 내마모성과 같은 특별한 성질을 부여할 수 있다. 표면처리는 크게 두 가지로 분류된다. 하나는 재료의 표면에 요구되는 성질을 가진 재료를 추가하여 코팅층을 생성하는 것으로, 모재로 사용된 재료는 층의 조직 생성에 약간의 영향을 미친다. 층과 모재 사이는 매우 얇은 경계영역으로 서로 분리되어 있으며 경계층으로부터 모재 내부의 조직 특성과 성질이 급격히 변한다. 두 번째 방법은 가장자리층 처리로, 가장자리 영역의 화학적-열적 반응을 통하여 표면에 성분을 보충하거나 또는 열처리 및 상변태 과정으로 가장자리 영역의 조직이 기존의 조직에 비해 현저하게 변화된다.

두 개 이상의 금속재료를 금속학적으로 결합시켜 일체화시킨 적층형 복합재료를 형성하는 공정을 클래딩이라 하며 이 또한 표면처리 개념 중 전자에 해당된다. 클래딩을 실시하기 위해서는 많은 기술이 있으며 주로 오버레이 용접, 용사, PVD, CVD 등이 있다<sup>14-15)</sup>.

##### (1) 오버레이 용접(Overlay welding)

오버레이 용접 기술은 내마모성, 내식성 또는 내열성을 갖는 용접재료를 이용하여 모재 표면에 수 mm~수십 mm의 두꺼운 표면개질층을 얻을 수 있는 표면처리법이다. 가혹한 조건에서 오랜 시간 사용됨에 따라 마모 및 부식 등으로 표면 손상이 발생한 부품의 수리를 위해 오버레이 용접이 매우 효과적으로 활용되고 있다. 일반적으로 기계와 설비부품은 탄소강, 스테인리스강 또는 내마모성이 부족한 구조용 재료로 제작되므로 오버레이 용접은 심한 마모를 받을 수 있는 부분이나 마모 및 손상된 부분에 적용될 수 있다. 따라서 생산제품의 품질을 향상시켜 수리 횟수를 감소시킬 수 있고 고가의 부품을 저렴한 가격으로 재생 가능하므로 생산원가 절감에도 크게 도움이 된다. 이 기술은 크게 하드페이싱,



빌트업, 버터링, 클래딩의 4가지로 분류되며, 이중 하드페이싱은 부품의 마모를 막기 위해 부품 표면에 경도가 높고 내마모성이 우수한 재료를 용접하는 것이며, 이 방법이 가장 많이 적용되는 분야는 굴삭기와 같은 건설 중기 등 건설 산업 분야이다. 빌트업은 사용에 의해 마모된 설비 및 부품 표면에 같은 재질을 용접하여 본래 치수로 만드는 것으로, 주로 금형 산업에 적용된다. 버터링은 크랙 및 모재 열 영향 방지 등과 같은 이유로 중간층을 만들어주는 오버레이 용접법이며 클래딩은 강의 양면 또는 한 면에 다른 금속을 접합하는 용접으로 마찰, 충격, 침식에 의하여 마모되거나 부식이 발생하는 부분에 적용하여 원가 절감을 실현할 수 있다<sup>16-17)</sup>.

오버레이 용접은 일반적으로 에너지원에 따라 Table 2.1과 같이 가스용접, 아크용접, 레이저 및 전자빔 표면개질로 분류한다. 선박용 엔진부품 중 피스톤 크라운(piston crown)의 링 그루브(ring groove) 및 헤드(head)부의 수리를 위해 서브머지드 아크용접(Submerged arc welding, SAW)이, 배기 밸브(exhaust valve)의 밸브 스피들(valve spindle)과 밸브 시트(valve seat)에는 플라즈마 이행아크(Plasma transferred arc, PTA)용접이 주로 적용되고 있다. 이외에도 다양한 방법이 사용되고 있으며 레이저를 이용한 방법도 많이 사용되고 있는 추세이다.

#### 가. 서브머지드 아크용접

전기아크용접은 두 개의 서로 다른 전극사이에 전압을 걸어 발생된 아크열을 이용하여 소재의 표면에 오버레이 용접재료를 용해·적층시키는 방법이다. 전극을 오버레이 용접 재료로 사용하는 것을 소모 전극식 오버레이 용접이라 하며, SMAW(Shield metal arc welding), SAW(Submerged arc welding), GMAW(Gas metal arc welding)가 여기에 속한다. 전극과는 별도로 오버레이 용접 재료를 사용하는 것을 비소모 전극식이라고 하며, 소모 전극식보다 용접 입열량이 낮기 때문에 희석정도가 적으며 용착속도 또한 낮다.

서브머지드 아크용접은 선행하여 놓이는 입상플럭스(granular flux) 속에 와이어 형태의 전극을 연속적으로 공급하여 플럭스가 덮인 상태에서 아크를 발생시켜 용접하는 방법이다. 플럭스는 광물질로 구성되어 있으며, 별도의 가스 공급 없이도 플럭스가 아크 및 용융금속을 덮어 대기의 침입을 방지하는 것뿐만 아니라 아크열에 의해 용융되어 슬래그가 되면서 용융금속을 보호할 수 있다. 이외에도 플러스를 사용

함으로써, 결함이 없는 깨끗한 오버레이 층을 얻을 수 있으며 용해된 플럭스에는 도전성을 갖게 되어 국부적으로 높은 용착속도를 낼 수 있다. 이러한 특성을 갖는 플럭스는 사용하기 전에 건조시켜야 하며 보관에도 주의를 기울여야 한다.

SAW는 대전류 및 다전극 용접이 가능하기에 용착속도가 빠른 고효율 용접법이다. 자동공정이므로 작업자의 숙련도에 관계없이 아크가 안정되고 기공이 없으며 비드 표면이 매끄러운 오버레이 용접층을 형성할 수 있다. 하지만 용접 자세가 아래보기 및 수평 필릿 자세로 제한적이기 때문에 톨 및 평판 형상의 모재에만 오버레이가 가능하며 모재의 회석률이 높아 클래드 분말의 특성을 최대한 얻기 위해서는 2~3층까지 적층할 필요가 있다. 이 방법은 주로 제철소의 연속주조용 가이드롤 및 압연 관련 롤 등에 적용된다.

#### 나. 플라즈마 아크용접

플라즈마란 기체가 6000 ℃ 이상으로 가열되어 양이온(positive ion)과 전자(electron)로 전리(ionization)된 상태를 의미한다. 일반적으로 플라즈마 아크용접 시, TIG 아크 방식을 이용하여 전극을 둘러싸고 있는 노즐을 통해 흐르는 가스를 이온화시켜 플라즈마를 형성한다.

오버레이 용접재료에는 피복이 없는 봉, 와이어 또는 분말이 있으며 분말을 사용할 경우 플라즈마 이행아크(Plasma transferred arc, PTA)를 이용한다. Fig. 2.1에 나타내듯이 분말은 불활성 분위기의 플라즈마 토치로 이송되어 직접 아크로 분출되면서 용융되어 모재에 접합하게 된다. 용접봉이나 와이어를 사용하는 PAW(Plasma arc welding)는 GTAW(Gas tungsten arc welding)와 유사하지만 PAW는 아크가 길기 때문에 오버레이 용접층의 모양과 위치조절에 유리하다. 용접재료로 와이어를 사용하면 모재에 용해되어 접합하게 되도록 하나의 용융지에 두 개의 독립된 전원 시스템이 필요하다. 하나는 저항가열용으로 오버레이 용접재료를 높은 온도까지 상승시키며 다른 전원은 아크 에너지를 이용하여 오버레이 용접재료를 녹여 모재에 융합시킨다. 고온 와이어를 사용하면 용착 속도가 4배 이상 증가된다.

PTA 하드페이싱은 비교적 두꺼운 오버레이 용접층이 형성 가능한 매우 유망한 표면개질기술이다. 특징으로는 저렴한 가격, 우수한 용착효율, 쉬운 작업성, 합성이 용이한 분말공급시스템이 있으며 표면 예비처리가 필수적이지 않다.

하지만 오버레이할 부분이 평면 혹은 원통형이 아닐 경우 특별한 공구가 필요하며, 보호가스가 전극과 용접금속 보호뿐만 아니라 분말 공급에도 사용되므로 GTAW에 비하여 가스 소모량이 많은 편이다.

#### 다. 레이저 오버레이법

레이저 오버레이법은 1975년 고출력 가스 레이저( $\text{CO}_2$  레이저)의 발달로 가능하게 되었으며 이 기술에는 레이저 합금화, 레이저 클래딩, 레이저 용해·입자 분사 등이 있다. Fig. 2.2는 이러한 세 가지 프로세스의 코팅과 모재 사이의 단면과 성분 특징을 나타내고 있다. 다른 열원을 이용할 수 있지만, 부분적인 가열이 용이한 고출력 레이저를 이용하는 경향이 증가하는 추세이다.

##### ① 레이저 합금화(Laser alloying)

레이저를 이용하여 원하는 깊이만큼 표면을 용해시켜 적은 양의 분말을 계속 첨가하여 표면층을 형성하는 방법으로 용융부는 균일하게 혼합되어 표면층은 모재와 분말이 충분히 섞인 합금층이다. 짧은 시간에 원하는 깊이만큼 층을 형성할 수 있으며 필요한 합금을 조성하기도 쉽다. 따라서 저렴한 소재를 국부적으로 처리하여 내마모, 내식 및 고온 내식성을 향상시킬 수 있다.

##### ② 레이저 글레이징(Laser glazing)

레이저 빔을 조사하면 가공물의 표면 부이 용융되고 매우 빠른 속도로 냉각되어 표면층이 빠르게 담금질된다. 이 과정 결과 색다르고 유용한 특징을 갖는 표면 미세구조를 얻게 되고, 빠른 응고속도로 결정립의 크기가 매우 작아져 표면 구조가 유리질처럼 보일 수 있어 글레이징이라 한다. 금속과 세라믹 모두에 적용되며 또한 이 방법은 제어와 반복이 가능하다. 레이저 글레이징에 의해 비정질, 유리질 또는 비결정화 구조의 표면을 얻을 수 있으며 이러한 표면층은 내마모성이나 내식성이 뛰어나다.

##### ③ 레이저 클래딩(Laser cladding)

레이저 클래딩은 상대적으로 저렴한 기판물질의 표면에 비싼 합금으로 덮어 씌우는 것으로 레이저 합금화와는 달리 모재의 희석을 최소화해야 한다. 레이저



빔을 이용하면 용점이 높은 재료를 사용할 수 있으며 보통 Co계, Ni계 또는 Fe계 합금 등을 들 수 있다. 기존 클래딩 기술사용 시, 다량의 열이 필요하게 되고 그에 따라 가공물의 열변형, 코팅층의 다공성, 클래딩 재료의 농도저하 등 여러 문제점이 있지만, 레이저 클래딩으로 이러한 문제점을 줄일 수 있다. 레이저 합금화에 비해 모재의 희석을 최소화하여 오버레이 재료의 성질을 더욱 잘 나타낼 수 있고 열 변형이 감소하며 프로세스의 제어성이 우수하다는 특성을 가진다<sup>16-18)</sup>.

**Table 2.1** Specification of overlay welding methods

Energy source	Welding methods
Gas flame	Oxy-acetylene welding, OAW
Electric arc	Shield metal arc welding, SMAW
	Submerged arc welding, SAW
	Gas metal arc welding, GMAW
	Gas tungsten arc welding, GTAW
Plasma arc	Plasma transferred arc welding, PTAW
Laser	Laser surface treatment
Electron beam	Electron beam surface treatment

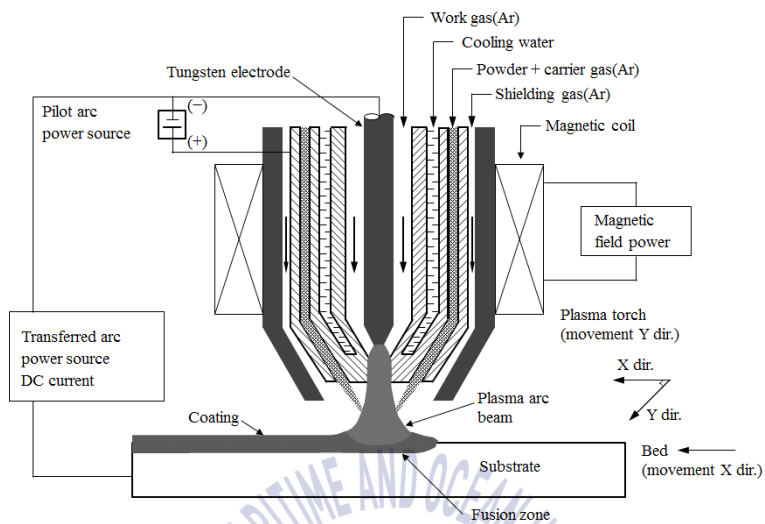


Fig. 2.1 Schematic diagram of the PTA cladding process

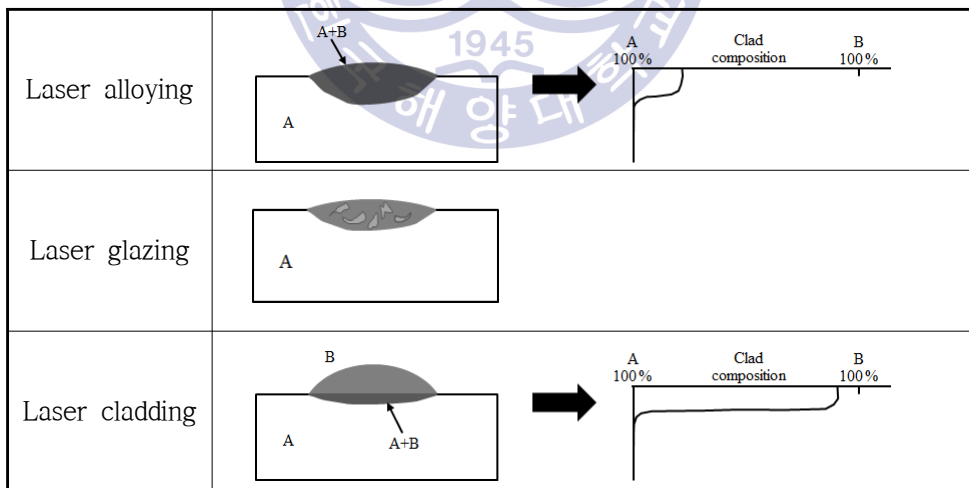


Fig. 2.2 Different microstructure of laser alloying, glazing and cladding

## (2) 용사(Thermal spraying)

용사는 금속 또는 금속산화물의 미세 분말을 고온의 열원으로 용융시키면서 표면에 고속 분사 및 충돌시켜  $10^4 \sim 10^7$  K/s의 빠른 속도로 응고된 피막을 형성하는 방법이다. 피막에 우수한 내식성, 내마모성, 내산화성 또는 열·전기 절연성을 부여하여 소재의 표면을 개선시킨다. 재료의 종류에 구애받지 않고 적용할 수 있고, 피막형성 속도가 빠르고 두꺼운 피막의 제작이 가능하기 때문에 물리·화학진공증착, 도금 및 이온 투입법과 같은 표면처리에 비하여 폭 넓게 이용되고 있다. 용사법의 종류는 에너지원에 따라 크게 가스식용사(Gas flame spraying)와 전기식용사(Electric thermal spraying)로 분류된다. 가스식용사는 산소와 가연성 가스(아세틸렌, 프로판가스 등)의 연소 또는 폭발에너지를 이용하므로 화염용사(Flame spray, FS)와 폭발용사(Detonation-gun spray, D-gun spray)가 있다. 전기식용사의 종류로는 아크용사(Arc spray, AS), 플라스마용사(Plasma spray, PS), 선풍용사(Metal-explosion spray)가 있다. Fig. 2.3과 Table 2.2에서 용사법의 종류별 개략도와 그 특징을 나타낸다.

실제 산업현장에서는 선박용 엔진부품 중 피스톤 로드(piston rod)의 수리 및 보수를 위해 플라스마 용사가 주로 사용되고 있다. 플라스마 용사는 대기 플라스마 용사(Atmospheric plasma spray, APS)와 진공 플라스마 용사(Vacuum plasma spray, VPS)로 분류된다. 대기 플라스마 용사는 Ar, He, N<sub>2</sub> 등의 가스를 이온화시킨 플라스마를 노즐로 배출시켜 초고온, 고속의 플라스마 제트를 열원으로 하는 피막형성 기술이다. 플라스마 발생장치는 Cu로 이루어진 양극과 W으로 된 음극으로 구성되어 작동가스를 플라스마 화하여 제트를 형성한다. 화염 속으로 공급된 분말은 용융되어 플라스마 제트 내에서 가속되고 소재에 충돌하여 피막을 형성한다. Ni, 고탄소강, 스테인리스강 외에도 Mo, W 등의 고용점 금속과 ZrO<sub>2</sub>, 탄화규소, 탄화티타늄 등의 고용점 세라믹의 용사도 가능하다.

Fig. 2.4에 나타난 바와 같이 진공 플라스마 용사 장치는 작동가스가 공급되는 진공노즐이 있는 플라스마 토치와 전기 아크 발생기로 구성된다. 감압 중에 작동하는 플라스마 제트는 APS보다 제트의 흐름이 고속화되고 길이가 더 길고 고온영역이 더 확대되므로 제트 중에 공급되는 분말이 균일하게 가열, 가속되어 치밀하고 결합성 높은 피막이 형성된다<sup>16,19-21)</sup>.

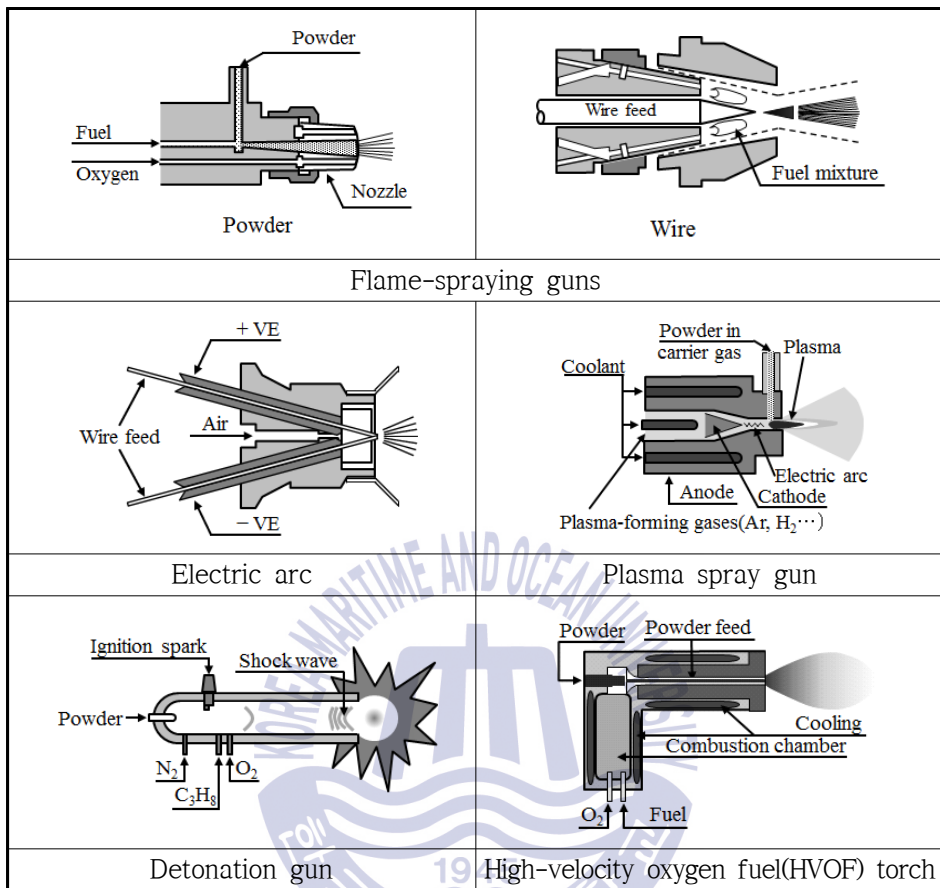


Fig. 2.3 Schematic diagram of the different thermal spraying process

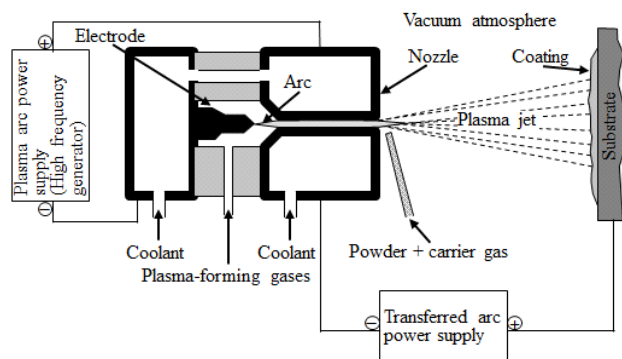


Fig. 2.4 Principle of the VPS

**Table 2.2** Characteristics of different thermal spraying process

Spraying methods		FS/ powder	FS/ wire	HVOF	D-gun spray	AS/wire	APS	VPS
Heat source		Gas combustion (oxyacetylene)		Gas combustion (oxygen + propane, propylene, hydrogen etc.)	Gas combustion (oxygen + acetylene, propane etc.)	Electric arc	Plasma	
Propellant		Combustion flame (+ compressed air)		Combustion	Shock wave	Compressed air	Plasma (gas expansion)	
Parameters of interaction with powder	Flame or jet temperature(°C)	2200 ~ 3200	2600 ~ 3200	2500 ~ 3100	3000 ~ 4000	4000 ~ 5500	5500 ~ 15000	6000 ~ 15000
	Velocity of particles on impact(ms <sup>-1</sup> )	30 ~ 100	30 ~ 180	400 ~ 900	500 ~ 910	32 ~ 240	150 ~ 400	200 ~ 700
General characteristics of coatings obtained	Adhesion(MPa)	7 ~ 15	7 ~ 15	>70	>70	10 ~ 20	20 ~ 70	20 ~ 70
	Relative cohesion	Low	Medium	Very high	Very high	High	High	Very high
	Average porosity(%)	8 ~ 20	8 ~ 20	<1	<0.5	6 ~ 15	1 ~ 10	<1
	Oxide content(%) (metals)	6	4	0.2	0.1	0.5 ~ 3	0.5 ~ 1	p.p.m
Materials that can be sprayed	Form	Powder	Wire	Powder	Powder	Wire	Powder	Powder
	Metals	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes if available as wire	Yes	Yes
	Ceramic oxides	Yes(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Yes(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	Yes	Yes	No	Yes	Not used
	Nitrides, carbides, etc.	No	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes + borides and silicides
	Cermets	No	No	Yes	Yes	No	Yes	Yes

## 2.1.2 클래딩 재료의 종류

분말 용사 기술은 1971년 항공기 부품의 내열성, 내마모성 향상을 위하여 처음 적용된 후, 1980년대 중반부터 많은 관심을 가지고 연구되어 현재 산업 전반에 걸쳐 널리 이용되고 있다. 하지만 대부분 중소기업의 형태로 운영되고 있으며 기술개발 능력의 부재와 함께 기술개발이 제대로 이루어지지 않고 있다. 따라서 대부분의 기술을 선진외국에 의존하고 있으며 용사 장비 및 용사용 분말을 전량 수입하고 있다. 현재 일부 학교 및 연구소를 중심으로 용사 관련 연구가 진행되고 있으나, 대부분이 용사 공정에 대한 연구로써 용사용 분말재료 개발에 대한 연구는 거의 전무한 실정이다<sup>21)</sup>.

오버레이 용접 또한 1970년대 초부터 발전소, 제철소, 시멘트 공장 등을 중심으로 적용되기 시작했으며 이때를 기술 도입기(1970년대~1980년대)라 한다. 기술 도입기에는 오버레이 용접재료 전량을 고가의 외국 수입재료에 의존하였기에 원가 부담 및 응용 기술력의 부족으로 국내에서 일반화된 기술로써 널리 알려지지 못하였다. 90년대 이후부터는 기술 자립기로 오버레이 용접재료의 국산화 제조가 시작되었으며 현재까지 철합금, 니켈, 코발트 등 다양한 합금뿐만 아니라 최근에는 타이타늄 합금과 초경합금 분말의 국산화에 성공했다. 하지만 국산화된 분말은 수입품에 비해 불균일한 입자 크기로 품질이 떨어지는 단점이 있으며 이 문제점의 개선과 더불어 용접 시공 상의 공법개선을 통해 제조업체의 생산성 및 국제 경쟁력을 향상시켜야 할 것이다<sup>22-23)</sup>.

클래딩 재료는 적용하고자 하는 분야의 사용조건 및 목적에 따라 달라진다. 사용하는 클래딩 방법 또한 클래딩 재료의 종류 및 형상에 영향을 미치며, 재료 형태로는 대개 주조한 봉, 피복전극, 와이어 및 분말이 있다. 금속계 재료를 이용하여 오버레이 용접 또는 용사 시 주로 분말이 사용되었다.

본 연구에서는 내마모성재료를 사용하였으며, 금속, 세라믹스 및 복합재료와 같이 여러 가지 선택 범위가 있지만, 대부분 사용되는 종류에는 Fe계, Ni계, Co계이다. 오버레이 용접합금의 미세조직은 연성인 Fe계, Ni계, Co계의 기지조직에 탄화물, 붕화물 또는 금속간 화합물과 같이 경도가 높은 석출물로 구성되어 있다.

### (1) Co계

Co계 합금은 고온에서의 내열피로도 및 내식성, 내마모성이 뛰어나며 특히 다른 합금에 비해 내식성 및 내산화성이 뛰어나다. 가격이 비싸 주기적인 보수에 따른 비용이 크지만 뛰어난 특성으로 인해 다양한 종류의 Co계 합금이 분말과 와이어 형태로 마모에 발생하기 쉬운 산업용 부품에 많이 사용되며 또한 선박 엔진의 흡·배기 밸브, 밸브 시트 표면, 원자력 및 핵발전소의 밸브의 표면실링에도 적용되고 있다.

1907년 미국의 E. Haynes가 발명한 Co계 초내열합금 스텔라이트(stellite)는 Co에 Ni, Cr, W, C와 같은 원소를 첨가한 것이다. 첨가된 원소 중 Cr은 Co기지에  $Cr_7C_3$ 와  $Cr_{23}C_6$ 의 크롬탄화물을 형성하여 우수한 내마모성을 나타내며 또한 고온에서 산화층의 형성으로 내식성 및 내산화성을 향상시킨다. Mo과 W과 같은 고용점 금속은 MC와  $M_6C$  탄화물과  $Co_3(Mo, W)$ 와 같은 금속간 화합물에 의한 석출 경화로 강도가 높아지며, Ni은 연성을 증가시키는 역할을 한다. 따라서 스텔라이트는 내열성이 강하며 내마모성, 내식성, 내고온 산화성이 우수하다. 합금성분 차이에 따라 크게 스텔라이트 1, 6, 12, 21, 31로 분류할 수 있으며, Table 2.3에 그 종류에 따른 성분과 특성 및 주요용도를 나타내었다.

C 함유량이 증가할수록 경도가 상승하며 내마모성 또한 증가하게 되므로 스텔라이트 합금 중 탄소량이 가장 높은 스텔라이트 1은 경도가 50~58 HRC 범위로 내마모성이 상당히 뛰어나며 내식성 또한 우수하다. 그리고 760℃ 이상의 온도에서도 경도가 유지되어 펌프 슬리브(pump sleeve), 로타리 실링(rotary seal rings), 마모 패드(wear pads) 또는 베어링 슬리브(bearing sleeve)등에 적용된다. 하지만 높은 탄소함량으로 충격저항, 용접성 및 기계 가공성이 낮으며 균열이 발생하기 쉬우므로 냉각속도의 최소화가 필요하다. 스텔라이트 6은 내마모성 Co계 합금 중에서 가장 일반적으로 많이 사용되고 있다. 넓은 온도범위에서 우수한 내마모성과 내식성을 나타내며 최대 500℃까지 적절한 경도를 유지한다. 특히 충격 마모와 캐비테이션 침식에 강하며 다양한 클래딩 방법으로 적용 가능하다. 화학공장에서 사용되는 스텔인리스 300계열 합금 표면에 스텔라이트 합금으로 클래딩하여 내마모성 및 내식성을 개선시킬 수 있으며, 이외에도 밸브시트, 펌프 샤프트 및 베어링, 방식막(erosion shield) 또는 롤링 커플즈(rolling couples)에 적용된다. 스텔라이트 6보다



W함량이 더 증가한 스텔라이트 12는 침식, 연삭마모, 미끄럼 마모에 대한 저항성이 뛰어나며 더 우수한 고온 경도를 나타내기 때문에 카펫, 플라스틱 및 제지 커터날(industrial knives for cutting), 목재톱날(saw tips in the timber industry), 베어링 부시(bearing bushes)에 사용된다. 이외에도 고온 및 기계적인 충격에 우수한 스텔라이트 21은 단조 또는 핫스탬핑 다이(forging or hot stamping die), 석유화학 및 발전소의 밸브 트림(valve trim)에, 고온에서의 강도와 내화성이 뛰어난 스텔라이트 31은 고온 가스에 침식받기 쉬운 가스 터빈 엔진에 주로 적용된다.

Co계 합금은 Ni계 및 Fe계 합금보다 고온에서의 더 높은 응력 저항성을 가지며, 높은 Cr 함량으로 인해 가스 터빈 내 오염된 환경 속에서도 고온 내식성을 가진다. 또한 Ni계 합금보다 고온에서의 내피로성이 더 우수하며 용접성도 더 좋다. 다양한 종류의 Co계 합금은 이러한 우수한 특성을 가지지만 Ni계 합금에 비해 상온에서 더 낮은 연성과 파괴 인성을 가진다. 또한 Co 금속이 방사선피폭의 공급원이라는 염려와 비싼 가격으로 인해 여러 나라에서 스텔라이트와 거의 동등한 특성을 나타내나 Co 무첨가 신 합금으로 Fe계와 Ni계를 이용한 합금에 대한 연구가 활발히 추진 중이다.

## (2) Ni계

주, 단조 Ni합금의 경우는 우수한 내식성과 높은 고온 강도를 가지는 내식재료 및 항공재료로 사용되나, 내마모성 개선을 위해 클래딩용 Ni합금이 개발되었다. 오래전부터 사용되어온 대표적인 Ni합금은 NiCrBSi합금으로 경도 및 인성이 우수하고 자용성(self-fluxing) 성질을 가져 내마모성 및 내식성 코팅이 적용되는 광석채굴, 석유탐사, 발전 및 시멘트산업에 널리 이용되고 있으며 고압의 가스 터빈 블레이드에도 적용된다.

1940년대 영국에서 제트 엔진의 터빈 블레이드를 위해 처음 개발된 니모닉(nimonic)은 50 % Ni과 20 % Cr에 Ti 및 Al과 같은 다른 원소를 첨가시켜 이루어진 초내열합금의 일종이다. Ni을 주체로 한 다른 초내열합금에는 인코넬(inconel)이 있으며 Cr과 Fe이 첨가되었다. 니모닉과 인코넬 이 두 합금은 고온에서의 더 높은 강도와 저항성을 가지며 따라서 상용 엔진 및 군사용 엔진에 사용된다.

니모닉은 20 % Cr에 Ti과 C를 가해 니모닉 75가 되었으며, 여기에 Al을 첨가하여



니모닉 80, 90, 95, 100으로 개발되었다. 금속의 질을 강화하기 위해 Co나 Mo까지 첨가하게 되었다. 니모닉 75는 고온의 사용 환경에서 내산화성과 내식성이 요구되는 강판(sheets)과 가스 터빈 엔지니어링(gas turbine engineering), 용해로 부품(furnace components) 및 열처리 장비(heat-treatment equipment)에 주로 사용되며 Co와 Al이 첨가된 니모닉 90의 경우 터빈 블레이드(turbine blade), 디스크(disks), 단조품(forgings), 고온용 공구(hot-working tools)에 적용된다.

인코넬은 Ni을 주체로 Cr, Fe, Ti과 소량의 Al, Mn, Si를 첨가한 합금으로, 900 ℃ 이상의 산화기류나 황을 함유한 대기 속에서 산화 및 침지되지 않으며 신장, 인장강도 및 항복점과 같은 여러 특성이 600 ℃까지에서도 변하지 않는다. 76Ni-15Cr-8Fe으로 구성된 인코넬 600은 고온 내산화성, 내침탄성 및 염화물이 포함된 환경에서의 저항성이 우수하므로 원자로의 표준 재료이며, 화학산업에서 가열기, 증류 가마, 증발기 관 및 응축기에 적용된다. 인코넬 625는 Ni-Cr-Fe-Mo 합금으로 다양한 부식 조건에서의 내식성이 매우 뛰어나며 극저온에서 1093 ℃까지 우수한 강도와 인성을 가지므로 벨로우즈(bellows)와 익스펜션조인트(expansion joint), 제트엔진 배기시스템(jet engine exhaust system)등에 적용되며, 인코넬 718의 경우에는 55Ni-21Cr-5Nb-3Mo의 성분비로 용접 동안 균열을 방지하기 위하여 Nb을 첨가하였으며 항공기나 극저온용 탱크 설비에 사용된다.

Ni계 합금은 Co계 합금에 비하여 강도가 높고 상온에서의 인성과 파괴인성이 우수하며 현재 합금의 개선 가능성 또한 많기에 Ni을 Co의 대체물로 사용될 수 있다. Co 혹은 Ni계 합금을 이용하여 마모에 대한 문제를 해결해왔으나 원자로 부품과 같이 일부는 극심한 작업조건에서도 마모손상에 견뎌내야 한다. Co계 합금은 방사선 활동으로 바람직하지 못하므로 Ni계 합금의 사용을 고려해야 하며, 연구를 통해 Ni계 합금으로 오버레이 용접 시 550 ℃에서 40년 동안 적절한 경도를 유지할 수 있는 오버레이 층을 확인하였다.

### (3) Fe계

클래딩용 Fe계 합금은 다른 합금에 비해 가격이 저렴하고 원하는 특성을 광범위하게 적용 가능하므로 Co계 또는 Ni계 합금에 비해 많이 사용되고 있다. 그리고 크기가 크고 형상이 불규칙하며 오염되기 쉬운 분쇄기, 연마기 및 건설

장비 등을 클래딩 시 장비의 사용을 중단해야하므로 저렴하고 쉽게 구입 가능한 Fe계 재료를 사용하려는 경향이 많다.

Co를 대체하기 위해 품질특성이 우수하고 가격이 저렴한 Fe계와 Ni계 용접재료에 대한 연구가 활성화 되고 있다. Fe과 Cr, C, Mn 또는 W으로 이루어진 합금의 경우 첨가된 성분으로 인해 고용강화 및 탄화물이 형성되고, 내산화성 및 내식성이 개선되기 때문에 스텔라이트 6보다 우수한 내마모성을 나타낸다고 보고되었다. 하지만 오스테나이트기지에 C, Cr, Si, W, Mo 및 B을 첨가하여 강화된 재료가 Co계 합금과 비슷한 경도와 내마모성을 나타내었지만 다량의 Fe 함량으로 인하여 200 °C 에서 고온경도와 스크래치 저항성이 급격히 떨어지는 것이 보고되었다.

Fe-Cr-C 합금계는 고경도 분산상인 크롬탄화물을 이용하는 대표적인 Fe 합금 중 하나로 Co계 합금을 대체하기 위해 많은 연구가 시도되고 있다. 고크롬-철계 합금에 일반적으로 첨가되는 합금원소로는 Mo, Ni, Mn, Cu 등이 있으며, Mo은 냉각시 펄라이트 변태를 억제하며 이차 탄화물 석출을 효과적으로 억제함으로써 경화능을 향상시키는 역할을 한다. Ni과 Mn, Cu 또한 경화능을 향상시키며 펄라이트 변태를 억제하는 역할을 한다. 이외에 Nb과 V을 첨가하여 고경도 탄화물을 형성함으로써 고크롬-철계의 내마모성을 향상시킨다.

Fe계 합금은 종류가 상당히 많기 때문에 화학조성으로 분류하기 보다는 여러 형태의 마모에 대한 적합성과 일반적인 미세조직에 의하여 분류하는 것이 적절하다. 따라서 대부분의 Fe계 합금은 미세조직상으로 펄라이트강, 오스테나이트 고망간강, 마르텐사이트강 및 고탄소, 고크롬 철계합금으로 분류된다<sup>13,16,23)</sup>.

**Table 2.3** Chemical composition, properties and applications to different types of stellite

Material	Chemical composition									Hardness (HRC)	Properties and applications
	Co	Cr	C	W	Ni	Si	Fe	Mn	Other		
Stellite 1	Bal.	33	2.45	13	2.5	1	2.5	1		51~56	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excellent abrasion &amp; corrosion resistance</li> <li>• Pump sleeves, rotary seal rings, wear pads, expeller screws, bearing sleeves</li> </ul>
Stellite 6	Bal.	28	1.2	5	3.0	1	2.5	1		40~45	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Most widely used of the wear resistant cobalt based alloys</li> <li>• Valve seats &amp; gates, pump shaft &amp; bearing, erosion shields, rolling couples</li> </ul>
Stellite 12	Bal.	29	1.85	9	2.5	1	2.5	1		46~51	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Better high temperature properties compared to stellite 6</li> <li>• Cutting edges of long knives in the carpet, plastics, paper &amp; chemical industries</li> </ul>
Stellite 21	Bal.	27	0.25		2.5	1	3.0	1	Mn = 5.5	28~40	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excellent resistance to thermal &amp; mechanical shock</li> <li>• Hot stamping die &amp; forging</li> </ul>
Stellite 31	Bal.	26	0.5	7.5	10.5	1	2.1	1		28~35	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resistance of oxidizing &amp; reducing atmospheres up to 1150 °C</li> <li>• Gas turbine in areas subject to hot gas erosion</li> </ul>

## 2.2 레이저 클래딩의 이해

클래딩은 부품의 표면 특성(내마모성, 내식성, 내열성 등)을 개선시키거나 마모된 부분의 표면을 재처리하기 위하여 모재의 상부에 새로운 표면층을 형성하는 방법으로 재료 표면의 얇은 층을 경화시키는 표면경화처리와는 차이가 있다. 기존에 사용해 왔던 클래딩 기술은 크게 아크 클래딩과 용사법으로 분류할 수 있으나 여기서 레이저 클래딩의 개발 및 발달로 다른 방법보다 더 많은 장점을 제공하게 되었다.

1960년 Maiman이 최초 가공용 레이저 빔을 개발함으로써 과학계에서는 큰 혁신이 일어났다. 레이저 빔은 단색성, 높은 간섭성, 직진성과 집광이 용이해 높은 에너지 밀도를 가지는 특성으로 1970년대에 이르러 상업용 레이저의 효율과 출력이 급속하게 증가하면서 공업적으로 재료가공에 응용되기 시작하였다. 1975년 고출력 가스 레이저의 발달과 함께 레이저 절단, 용접, 금속 표면 경화가 가능해졌으며 1970년 후반에 Rockwell International Corporation에서 Gnanamuthu에 의해 레이저 클래딩이 처음 사용되었으며 이 때, 분말정치법(pre-placed powder bed) 방식을 사용하였다. William M. Steen은 레이저 클래딩 기술의 엄청난 발전을 이끌었으며 Vijitha Weerasinghe와 함께 분말 공급 방식의 레이저 클래딩을 개발하였다. Jyoti Mazumder는 1980년대 레이저 클래딩 프로세스의 메커니즘을 연구하였으며 다양한 모델을 개발했을 뿐만 아니라 많은 금속과 세라믹을 사용하여 내마모성과 내식성을 평가하였다<sup>1-3,12)</sup>.

### 2.2.1 레이저 클래딩의 메커니즘

#### (1) 레이저 클래딩의 원리

레이저 클래딩은 레이저 빔을 이용하여 클래드 재료와 모재의 일부분을 녹여 모재와 금속적으로 완전히 결합한 코팅층을 형성하는 개선된 하드페이싱 프로세스이다. 레이저 클래딩에 있어서 관건은 클래드 층 내에 기공이나 균열과 같은 결함이 발생하지 않으며, 모재와의 접합강도가 높아 박리가 발생하지 않고 희석률이 낮아야한다<sup>24-25)</sup>. Fig. 2.5에 레이저 클래딩의 개략도를 나타낸다.

레이저 클래딩에서는 여러 가지 방법이 있다. 가장 많이 연구·사용되고 있는 방법은 동축 노즐 분말 공급법으로 모든 방향에서 가공이 가능하고 분말 효율이 높다는 특징을 가진다. Fig. 2.5의 개략도 또한 동축 노즐을 통하여 빔이 조사되고 분말이 공급되는 방식이다. 동축 노즐은 레이저 광학계와 통합되어 있으며 분말 형태의 클래딩 재료가 이송가스를 통하여 레이저 빔 조사축과 동일한 방향으로 공급된다. 이때, 이송가스는 주로 아르곤이나 헬륨과 같은 불활성 가스가 사용된다. 레이저 에너지는 공급되는 분말에 조사되면서 일부 에너지는 분말에 반사되거나 흡수되어 분말을 녹이고 남은 에너지는 모재 표면에 반사 및 흡수되어 매우 얇은 용융풀을 형성하게 된다. 빠른 속도로 응고하면서 용융된 분말과 모재간의 얇은 합금층이 형성되어 모재에 접합하게 되며 이때 표면 클래드 층의 고온부 산화를 방지하기 위해 용융부 주변을 실드가스로 보호한다<sup>2,4,13</sup>.

넓은 면적을 클래딩하기 위해서는 클래드 층의 중첩 과정이 필요하며, 중첩률에 따라 생산속도, 표면특성, 열 영향부의 특성이 변화하기 때문에 적당한 중첩률의 선택이 중요하다. 또한 한 번에 높은 클래드 층을 형성하게 되면 기공이나 균열과 같은 결함이 발생하기 쉬우므로 적절한 높이의 클래드 층을 쌓아올려야 한다.

## (2) 레이저 빔의 흡수 및 모재 합금 성분의 희석 과정

레이저 빔과 재료의 상호 반응 중 가장 중요한 것은 분말에 대한 레이저 빔의 흡수과정이다. 레이저 클래딩에서는 분말에 의한 레이저 빔의 흡수, 분말과 모재의 용융 및 합금 형성 등 복잡한 공정으로 빔과 재료의 상호 반응에 관한 연구 및 보고가 상당히 적다. 일본 도요타 중앙 연구소의 연구를 통해 분말에 의한 레이저 빔의 흡수 과정을 확인할 수 있다. Fig. 2.6은 모재에 미리 도포된 분말의 레이저 빔 조사 시간에 따른 용융과정을 나타낸다. (a)단계에서는 레이저 빔 조사 직후 빔이 다중반사에 의해 분말에 흡수되고 있으며 분말 형상을 그대로 유지하고 있다. 다음 (b)단계에서 경계층(boundary layer)이 형성되기 시작하며 분말의 크기와 온도가 증가하면서 흡수율 또한 상승하게 된다. (c)에서 분말들의 집합체가 형성되어 원래의 형상을 잃어버리고 (d)에서 제일 상부에 위치한 분말이 용융되기 시작한다. 레이저 빔이 계속 조사되면서 분말의 형상은 변화하게 되고 빔 흡수율은 (a)에서 (b)단계로 변화할 때 급격히 증가하나 (b)단계 이후에는 분말의 형상에

관계없이 흡수율은 거의 일정하다고 보고된다<sup>12)</sup>.

Fig. 2.7에 나타난 것과 같이, 모재 희석은 일반적으로 2가지 방식으로 이루어진다. 미리 도포된 분말층에 빔이 조사되면, 분말층(part 1)은 일부 빔 에너지를 흡수하여 녹게 되고 남은 빔 에너지는 모재 표면에 공급되어 표면 일부(part 2)가 용융되는 것을 Fig. 2.7의 (a)와 (b)에서 확인할 수 있다. Fig. 2.7의 (c)를 통해 용융 분말과 모재는 서로 혼합되어 용융풀이 형성되는 것을 알 수 있고, 이 부분이 초기 희석 영역이다. 용융풀은 발열 또는 흡열 반응으로 인해 응고가 진행되고 분말층과 모재에 접하는 용융풀의 경계층에서 에너지 상태가 변화하게 됨으로써 용융풀의 형상은 2가지 방식으로 다르게 나타난다. Route 1의 경우는 Fig. 2.7의 (d)에 나타내듯이, 용융풀과 분말층 및 모재의 접촉 경계면에서 에너지 축적 속도가 열전도에 의한 에너지 손실 속도보다 빠르면, 접촉 경계면의 에너지는 축적될 것이며 이는 분말(part 3)과 모재(part 4)의 두 번째 용융으로 이어질 것이다. 따라서 전체 용융부는 part 1~part 4의 합이 된다. 빔 스폿 사이즈는 6 mm, 미리 도포한 분말 층의 두께는 0.8 mm라 할 때, 모재 표면 위 분말 층과 모재 사이의 경계층의 빔 조사면적(A3, 약  $9\pi\text{mm}^2$ )은 분말 층과 용융풀의 접촉 면적(A1, 약  $4.8\pi\text{mm}^2$ )보다 더 넓기 때문에 A2의 면적이 A1보다 더 크다는 것을 알 수 있다. 따라서 모재의 두 번째 용융면적(part 4)은 분말 층(part 3)보다 더 넓어지기 때문에 처음 희석보다 더 증가하는 것을 Fig. 2.6의 (e)를 통해 확인할 수 있다. Rout 2의 경우는 Fig. 2.7의 (f)에 나타내듯이 분말과 모재가 두 번 용융되지 않으므로 용융부는 part 1과 part 2의 면적이며 희석은 처음과 거의 비슷하게 발생한다<sup>26)</sup>.

### (3) 클래딩 재료 공급방법

클래딩 재료 공급 방법에는 앞에서 언급한 분말공급법(powder injection)과 분말정치법(pre-placed powder), 와이어공급법(wire feeding)이 있으며 이에 관한 개략도를 Fig. 2.5 및 Fig. 2.8에 나타낸다. 먼저, 분말정치법은 가장 간단한 클래딩 방법 중 하나로 레이저 클래딩의 초기단계에서 가장 많이 사용된 방식이다. 모재 표면 위에 내마모성 및 내식성을 갖는 분말을 접합재를 이용하여 도포한 후 레이저 빔을 조사하면 분말사이의 낮은 열전도도로 인하여 모재표면까지 느리게 열이



전달된다. 모재에 열이 전달되면 열전도도가 급격히 증가하기 때문에 입열량을 적절히 조절함으로써 낮은 희석률과 건전한 클래드 층을 얻을 수 있다. 이 방식은 하나의 클래드 층을 형성하거나 평평한 표면의 클래드 층을 형성할 때 적절하지만 클래드 층을 중첩할 때 희석률이 상승하므로 적절하지 않다. Fig. 2.9에 나타내듯이 레이저 빔을 미리 도포된 분말에 조사하면 분말이 용융되기 시작한다. 용융풀의 너비는 모재 표면상의 레이저 빔의 길이와 비례하지만 응고되면서 표면 장력으로 인한 수축이 발생하는 것을 Fig. 2.9의 (a)를 통해 확인할 수 있다. 따라서 Fig. 2.9의 (b)에 나타난 바와 같이 응고된 클래드 층과 인접한 모재 표면상에는 도포된 분말이 남아있지 않으며 중첩하기 위하여 이 부분에 다시 레이저가 조사되면 희석률이 상당히 증가하게 된다. 이외에도 복잡한 형상의 부품에 균일하고 재현성있는 분말의 도포가 어려우며 기공이 발생하고, 클래드 층의 표면이 거칠다는 문제점이 있으나 무엇보다도 분말을 먼저 도포한 후 레이저를 조사하는 2단계의 프로세스이기에 산업 현장의 적용에 제한을 받는다.

클래딩 재료가 와이어 형태로 용융풀에 공급되는 와이어 공급법은 분말정치법과 달리 1단계 공정이며, 분말 공급법에 비하여 작업 환경이 깨끗하고 재료 효율성이 100 %에 가까워 비용을 절감할 수 있다. 이 방법으로 한 번에 연속적인 클래드 층을 형성할 수 있기에 회전 대칭 제품의 클래딩에 유용하다. 또한 와이어 공급을 일정하게 유지시킬 수 있으므로 다른 방법으로는 가공할 수 없는 장소에서도 클래딩이 가능하다. 하지만 와이어의 에너지 흡수율이 극히 적은 것이 가장 큰 문제점이며 이를 해결하기 위해 레이저 출력을 증가시키거나 와이어를 예열하여 흡수율을 증가시킬 수 있으나 희석률 조절이 상당히 어려워지게 된다. 게다가 일반적으로 와이어는 용융풀과 접촉하고 있으므로 용융풀의 진행을 방해해선 안 되기에 정확한 위치 및 공급 속도 조절이 필수적이다.

분말 공급법은 일반적으로 가장 많이 사용되는 레이저 클래딩 방법이다. 와이어 공급법에 비해 주변 환경이 오염되기 쉬우며 재료 효율이 낮지만 이 방법으로 레이저 클래딩 시 낮은 희석률과 우수한 결합력을 가진 클래드 층을 형성할 수 있다. 훨씬 더 많은 성분 및 합금을 와이어보다 분말로써 이용가능하기에 더 다양한 성분과 형상을 가진 클래드 층을 얻을 수 있으며 또한, 빔 진행을 방해할 수 있는 와이어와 달리 분말은 빔을 잘 통과시킨다. 와이어나 분말을 공급하면서



레이저 클래딩 시, 공급량을 조절함으로써 클래드 층의 두께 조절이 용이하다. 분말정치법에 비해서 용융풀의 깊이를 조절하기 쉬우며 기공 발생 가능성 또한 더 적다. 하지만 분말 입자에 의한 레이저 출력의 감쇠는 분말 공급량의 증가와 함께 비례적으로 증가해야한다<sup>2,4,13,27</sup>.

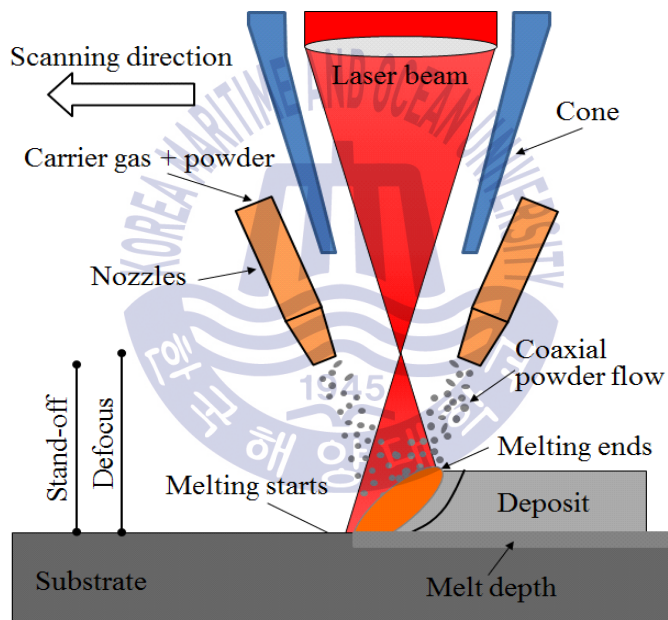
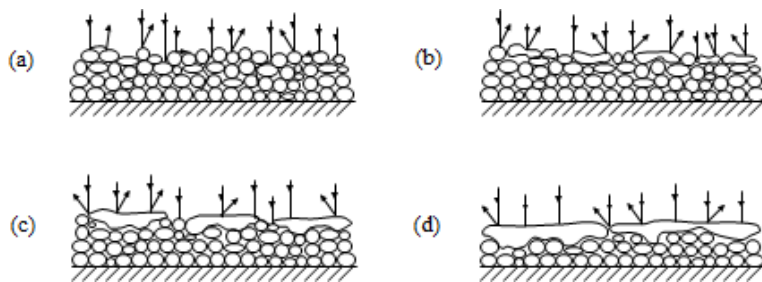
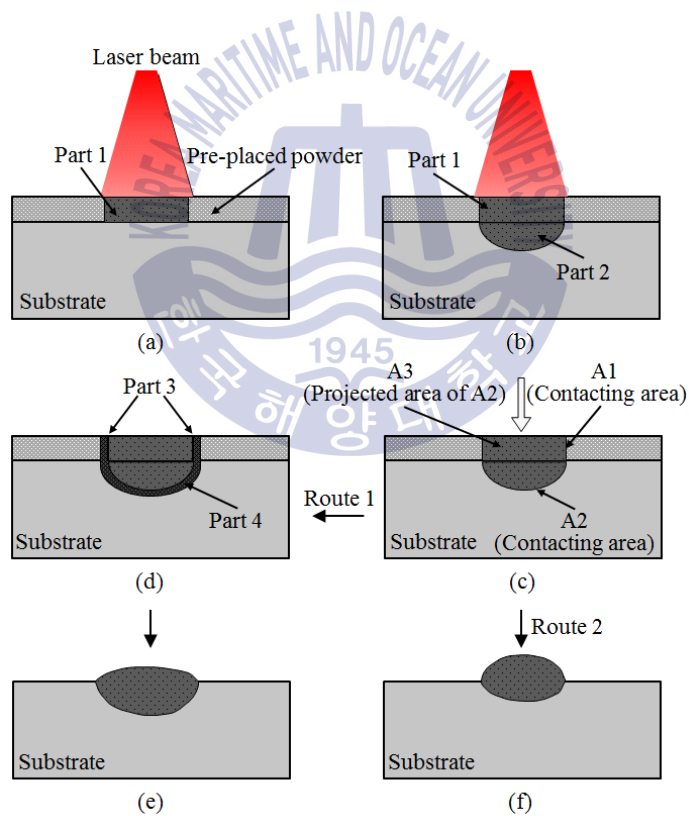


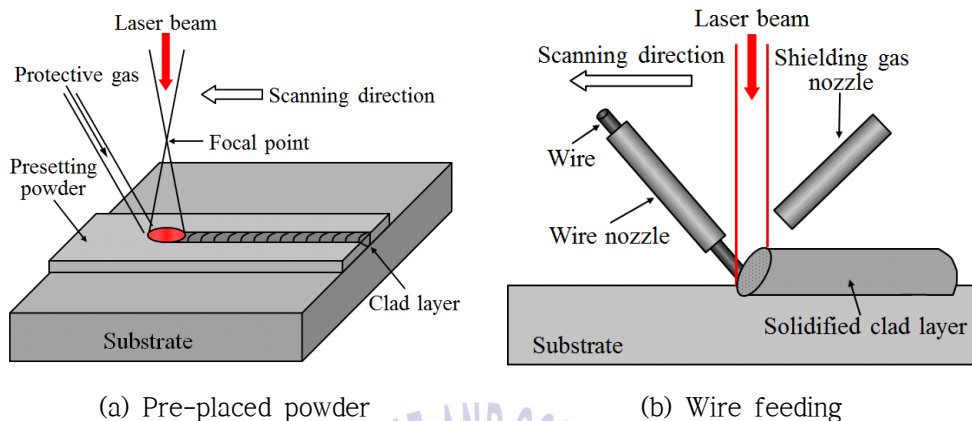
Fig. 2.5 Schematic illustration of laser cladding process by powder injection



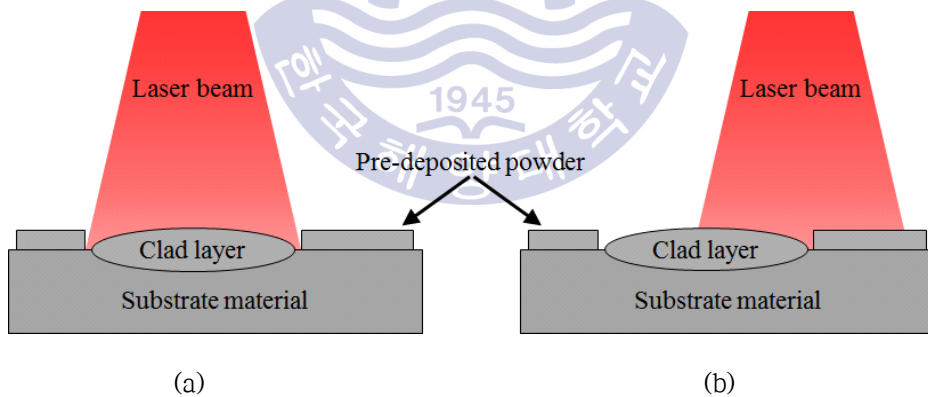
**Fig. 2.6** Illustration of the melting process of the laser cladding powder which was being irradiated by the laser beam



**Fig. 2.7** Schematic illustration of the dilution process



**Fig. 2.8** Different methods of laser cladding



**Fig. 2.9** Schematic illustration of laser cladding by pre-placed powder :  
 (a) Illustrates how the molten coating contracts when irradiated by the laser source, (b) Illustrates how contraction exposes the substrate increasing dilution in the adjacent coating

## 2.2.2 분말 공급 시스템의 원리

### (1) 분말 공급 장치

레이저 클래딩 시스템은 크게 레이저와 분말 공급 장치 그리고 구동부로 구성되어 있다. 이 중 분말 공급기는 레이저 클래딩, 용사 및 첩단 재료가공과 같이 분말 공급이 필요한 산업에서 가장 중요한 장치이다. 특히 일정하며 정확하고 재현할 수 있는 분말 공급은 레이저 클래딩에서 가장 기본적으로 갖추어야 할 조건이다. 다양한 종류의 분말 공급기는 작동 원리에 따라 중력기반(gravity-based), 기계적 휠(mechanical wheel), 유동상(fluidized-bed), 진동(vibrating)으로 분류할 수 있다. 모든 종류의 분말 공급기에는 분말을 공급하기 위해 이송가스를 공급해야만 한다. 본 연구에서는 중력기반 분말 공급기를 이용하였으며 각각의 분말 공급기의 특징은 아래와 같다.

먼저 중력기반 분말 공급기의 작동 원리는 모래시계와 유사하다. Fig. 2.10 (a)에서 나타내듯이 이 공급기는 기본적으로 전자저울과 오리피스를 기반으로 로드셀(load cell)로 구성되어 있다. 무게로 인해 분말 입자가 유동성을 가지게 되면 분말은 호퍼에서 오리피스로 흐르게 된다. 오리피스의 면적이 감소하거나 증가함으로써 노즐로 이동하는 분말의 양은 변화한다. 보다 더 정확한 분말 공급량을 위해 본 연구에서 사용된 중력기반 분말 공급기는 분말이 담겨져 있는 용기와 작은 구멍이 있는 원판으로 구성되어 있으며 Fig. 2.10 (b)에 모식도를 나타낸다. 분말은 이송가스의 공급으로 인해 흡입부분으로 이동되며 구멍의 크기와 원판의 회전속도로 분말 공급량을 조절한다.

기계적 휠 분말 공급기의 경우 다양한 크기의 분말 공급 시 유용하게 사용된다. Fig. 2.11에서 확인할 수 있듯이, 분말의 크기가 고르지 않기 때문에 서로 다른 공급 속도를 균일하도록 많은 나사 배열이 분말 공급기 내에 설치되어 있다. 이 타입의 경우 거친 분말 입자가 휠과 충돌하면서 휠에 급격한 마모가 발생되고 따라서 클래드 층의 품질에 변화를 야기할 수 있으며 유지비 또한 증가하게 된다.

유동성의 원리를 이용한 유동상 분말 공급 장치는 분말 공급 시 기계적으로 움직이는 부분을 제거하였다. 따라서 연속적이면서도 일정한 분말 공급으로 개선된 코팅층의 품질을 제공하면서 유지 및 부품 교체 비용이 감소하게 된다. Fig. 2.12에 개략도를 나타낸다.

Fig. 2.13에 나타내듯이 진동 방식의 분말 공급기는 얇고 바닥이 평평한 트레이로 이루어져 있다. 분말은 호퍼에서 트레이로 이동하고 외부 힘에 의해 트레이가 진동하여 분말이 아래로 떨어지게 된다. 이 장치는  $\pm 1\%$ 의 정확성을 가지며 최소 8 g/min에서 최대 2000 g/min까지 공급 가능하다<sup>2)</sup>.

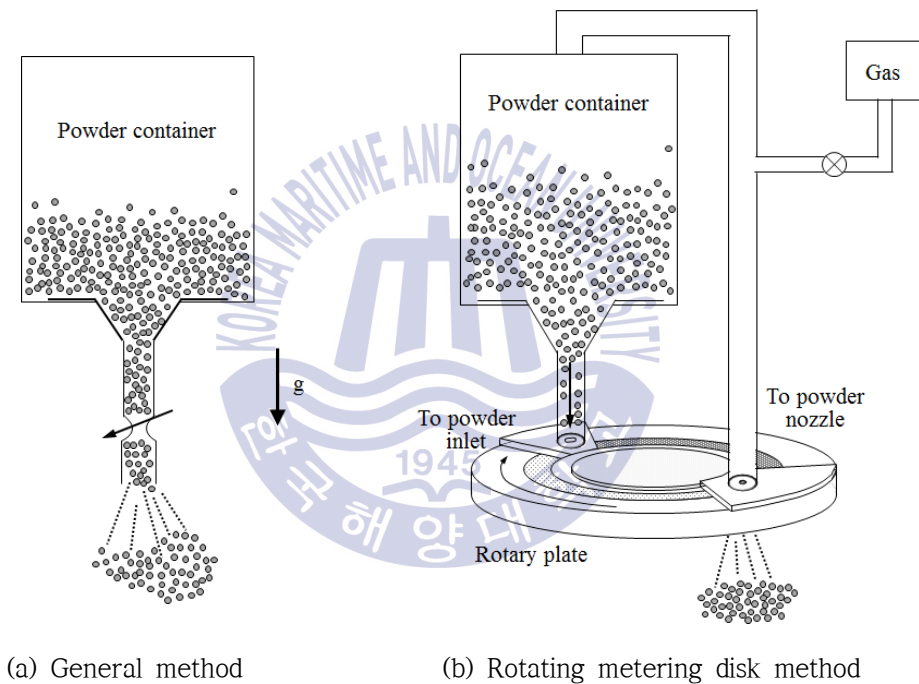


Fig. 2.10 Schematics of gravity-based powder feeder

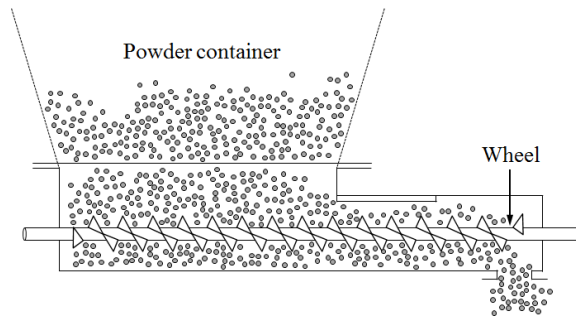


Fig. 2.11 A schematic of mechanical wheel powder feeder

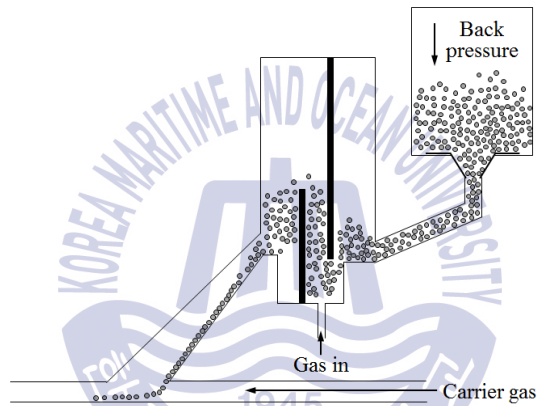


Fig. 2.12 A schematic of typical fluidized-bed powder feeder

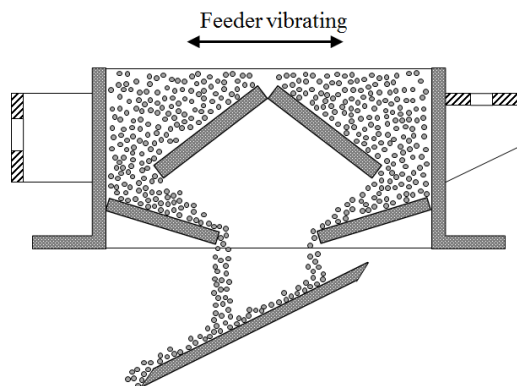


Fig. 2.13 A schematic of vibratory-based powder feeder

## (2) 분말 공급 노즐

분말의 흐름을 형성하고 이 분말을 용융폴로 공급하는데 있어서 노즐은 중요한 역할을 한다. 노즐은 레이저 빔의 광축을 기준으로 분말 공급 방향에 따라 동축(coaxial)과 외축(lateral, off-axis)으로 분류할 수 있다. 동축 노즐은 광축과 노즐 축이 일치하지만 외축 노즐은 Fig. 2.14에 나타낸바와 같이 레이저 빔 조사 방향에 비스듬하게 위치한다. 노즐의 위치는 분말 공급 축과 모재 사이의 각도,  $\theta$ 와 노즐 끝과 모재 사이의 거리  $l_s$ 로 정의한다. 외축 노즐 사용 시 분말 입자 흐름은 레이저 조사 방향과 동일하거나 반대방향으로 나눌 수 있다. 빔 이동방향과 분말 입자의 방향이 동일할 때 용융폴로 공급되는 분말이 더 많기에 효율이 더 우수하다는 것을 Fig. 2.15에서 확인할 수 있다. 그리고 노즐 끝에서부터 공급되는 분말은 퍼지기 시작하므로 노즐 끝과 모재 사이의 거리  $l_s$ 는 빔과 노즐의 충돌을 피하기 위해 필요하지만 가능한 짧을수록 분말 효율이 좋아진다. 일반적으로 거리  $l_s$ 는 8~12 mm 범위가 적절하다. 분말 공급 방향에 있어서 제한이 있기 때문에 주로 2차원적 적용에 사용되며, 트럭, 선박 또는 발전소의 엔진에서 대형 크랭크샤프트의 베어링 수리를 위해 적용가능하며, 좁은 형태의 분말 공급 노즐은 베어링 가장자리의 클래딩 시 적절하게 사용된다.

Fig. 2.16은 동축 노즐의 모식도를 나타낸 것으로, 레이저 빔과 같은 방향으로 수축-확산 분말 흐름을 형성한다. 분말 공급 장치로 이송된 분말은 2개 또는 3개의 동일한 분말 흐름으로 나누어지고, 노즐에서 공급되면 레이저 빔 주위에서 속이 텅 빈 원뿔 형상의 분말 흐름이 만들어진다. 분말 초점의 지름 크기는 노즐 입구(slit)의 크기와 노즐 끝과 분말 초점 사이 거리, 분말 공급량, 분말 입자 크기의 영향을 받는다. Fig. 2.17과 Fig. 2.18은 노즐 입구의 크기와 분말 입자 사이즈에 따른 분말 흐름 사진을 나타낸다. 노즐 입구 크기가 증가할수록 분말 초점의 지름은 증가하였으며 분말 입자 크기가 감소할수록 분말 초점의 지름은 더 감소하는 것을 확인할 수 있다. 동축 노즐은 광학계와 통합되어 있기 때문에 레이저 조사 방향 혹은 모재 이동방향에 영향을 받지 않아 2차원, 3차원 가공 모두 가능하고 높은 분말 효율을 가진다는 특징이 있다. 두 종류의 노즐 모두 분말이 노즐을 통과할 때, 효율을 높이기 위해 분말을 예열시킬 수 있다<sup>2,4,14,28</sup>.



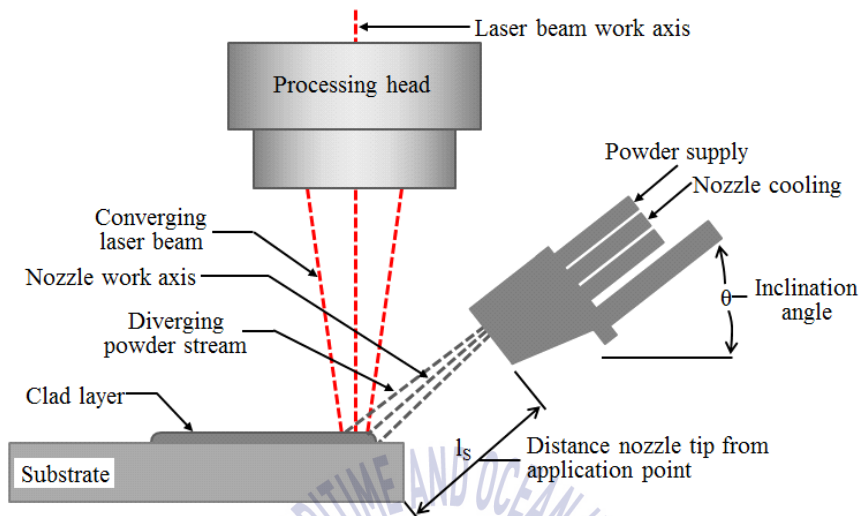


Fig. 2.14 Principle of off-axis cladding

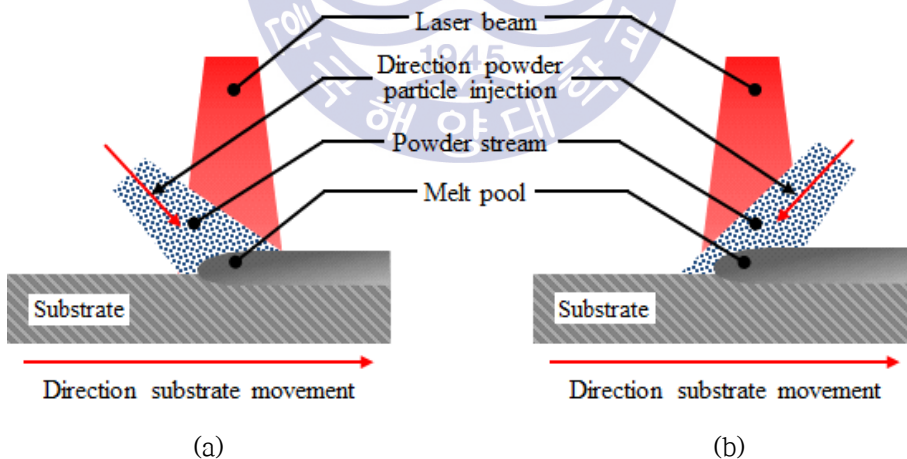
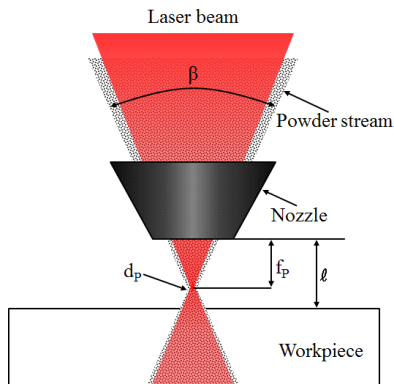
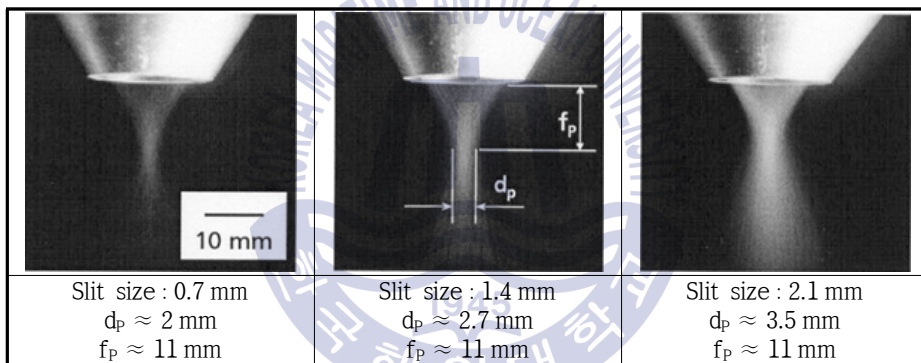


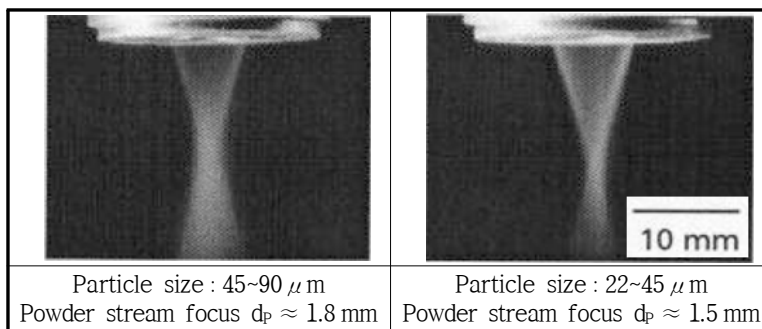
Fig. 2.15 Principle of two different off-axis cladding methods : (a) Illustrate of dragging injection, (b) Illustrate of stinging injection



**Fig. 2.16** Simplified schematic of a coaxial powder injection nozzle;  $\beta$  : apex angle of nozzle,  $f_p$  : distance between nozzle tip and powder stream focus,  $d_p$  : diameter of powder stream focus,  $\ell$  : distance between nozzle tip and workpiece



**Fig. 2.17** Influence of slit size on the core diameter of the powder stream focus of a coaxial powder injection nozzle, Fe-based powder, 50~150  $\mu$ m



**Fig. 2.18** Powder stream focus of two different particle sizes, Ni-based powder

### 2.2.3 레이저 클래딩의 특징 및 적용

일반적으로 아크 용접 기술로 형성된 코팅 층은 모재와의 결합력이 우수하고 기공 발생률이 낮으며 강도와 충격특성이 우수하다. 뿐만 아니라 작업 속도가 빠르며 장비 가격이 저렴하기 때문에 산업현장에서 많이 사용되고 있다. 하지만 입열량이 높아 모재의 회석이 많이 일어나며 제품의 기계적 변형을 발생시킬 수 있고 이로 인해 추가적인 후가공이 필요하게 된다. 용사 기술을 이용할 경우에는, 낮은 입열량으로 회석이 감소하며 금속, 탄화물, 세라믹과 심지어 플라스틱을 포함해 다양한 재료를 적용할 수 있지만 모재와의 결합력이 충분히 높지 못하여 부착과 나쁜 내마모성의 문제로 이어질 수 있다.

이와 달리 레이저 클래딩은 아크 용접과 용사 기술의 문제점 혹은 단점을 보완하여 보다 많은 장점을 제공한다. 특정 영역이나 매우 작은 부분을 레이저 클래딩으로 매우 정밀하게 코팅할 수 있으며, 형성된 코팅 층은 기공이 없고 모재와의 결합력이 상당히 우수하다. 또한 용접에 비해 모재 회석이 작아 클래딩 재료의 특성을 잘 나타내므로 생산비의 절감으로 이어질 수 있다. 모재의 입열량이 적어 열 영향 및 열 변형을 최소화하여 모재 자체의 기본적인 성질을 유지할 수 있고 따라서 후처리와 관련된 시간 및 비용을 상당히 감소시킬 수 있다. 그리고 레이저의 특성상 급속 가열 및 냉각으로 클래드 층의 조직이 훨씬 미세해져 더 우수한 내마모성 및 내식성 효과를 얻을 수 있다. 저가의 모재에 고성능 코팅을 형성하므로 귀금속 합금, 금속 및 기타 고가의 물질을 절약하여 제조비용의 상당한 절감이 가능하다. 하지만 레이저 클래딩의 가장 큰 단점은 레이저 클래딩 장비의 투자비와 운영 및 유지비가 기존 장비보다 상당히 비싸다는 것이다. 또한 레이저 클래딩 시 장비와 공정에 대한 충분한 학습 및 이해가 필요하다. 공정 관련 표준 규격이 아직 개발되지 않았기에 WPS(Welding procedure specification)와 같이 관련 공정변수 및 클래드 층의 사용 허용 범위 내용을 포함한 클래딩 절차 시방서가 작성될 필요가 있다. 레이저 클래딩과 기존 기술의 특성 차이를 Table 2.4에서 나타내고 있다<sup>2,4,14,24-25,29-30</sup>.

레이저 클래딩으로 형성한 클래드 층은 기계적(경도, 내피로성, 내마모성), 내식성, 내열성 및 생체 적합성 등과 같은 특성을 갖게 된다. 따라서 클래딩은 빠른 가열 및 냉각 속도나 부식성 기체 또는 고온, 침식 등이 작용하는 외부의 가혹한 환경에

노출되는 기계적 부품에 적용될 수 있다. 산업에서 처음으로 레이저 클래딩이 사용된 것은 1981년 Rolls Royce에서 RB-211 제트 엔진의 터빈 블레이드 인터락 슈라우드에 니모닉(nimonic)으로 육성 용접한 것이다. 따라서 General Electric, Pratt & Whitney, Rolls Royce, Allison, MTU와 같은 많은 엔진 생산회사에서 적용하기 시작했다. 자동차 업계에서도 엔진 밸브 시트 부분을 코팅하기 위해 Fiat, Toyota, Mercedes Benz와 같은 유럽 및 아시아의 자동차 회사에서 레이저 클래딩을 적용했다. 미국, 스위스, 네덜란드 및 아일랜드 등 많은 나라에서 터빈 블레이드의 수리를 위해 사용하고 있으며 이외에도 우주, 항공, 금형, 분쇄 등 많은 산업에 적용될 수 있다<sup>2,4,14</sup>.

**Table 2.4** Comparison between laser cladding and other coating technique

Processes Features	Laser cladding	Welding	Thermal spray	PVD
Bonding strength	High	High	Moderate	Low
Dilution	Low	High	Zero	Zero
Coating materials	Metals, Ceramics	Metals	Metals, Ceramics	Metals, Ceramics
Coating thickness	50 $\mu$ m~2 mm	1 mm~several mm	50 $\mu$ m~several mm	0.05 $\mu$ m~10 $\mu$ m
Repeatability	Moderate to high	Moderate	Moderate	High
Heat-affected zone(HAZ)	Low	High	High	Very low
Controllability	Moderate to high	Low	Moderate	Moderate to high
Cost	High	Moderate	Moderate	High

## 2.3 다이오드 레이저의 원리와 특성

레이저(LASER)는 유도방출에 의한 광의 증폭을 의미하는 것으로 “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation”의 머리글자를 따서 만든 단어이다. 1917년 알베르트 아인슈타인의 ‘유도방출 이론’을 토대로 1953년 미국의 물리학자 찰스 타운스가 레이저의 전신인 메이저(Maser, Microwave amplification by the stimulated emission of radiation)를 발명했다. 이는 유도방출에 의한 마이크로파의 증폭이란 뜻으로, 빛을 이용한 레이저와 다르다. 그 이후, 1960년 5월 16일 미국 휴즈 연구소 메이먼은 크롬 이온이 소량 함유된 산화알루미늄으로 만든 루비 막대를 사용하여 최초의 레이저를 만들었다. 이 빛은 단일파장으로 사방으로 퍼지지 않고 한곳으로 모여져 일반 빛보다 4배 강하였다. 최초의 고체 레이저 발명 이후 1960년 12월 가스 레이저인 헬륨-네온 레이저가 개발되었으며 1962년 반도체레이저가, 1964년 이산화탄소 레이저가 개발되어 다양한 분야에 활용되고 있다.

레이저는 밀도반전이 가능하며 외부 자극에 의해 유도방출이 일어나는 활성 매질의 종류에 따라 고체 레이저, 액체 레이저, 기체 레이저로 나눌 수 있으며 반도체 레이저는 전류로 펌핑하고 크기가 작다는 이유로 별도로 분류된다. 레이저 광의 특성으로는 멀리까지 나아갈 수 있는 직진성, 파장이 같은 단색성, 결맞음성(coherence), 밝기가 매우 밝은 고휘도성이 있다. 이러한 독특한 특성으로 통신과 의료, 군사, 해양, 항공, 및 자동차와 같은 수송 분야 등 폭넓은 분야에서 사용되고 있으며 연구되고 있다.

### 2.3.1 다이오드 레이저의 발진원리

1962년 제너럴 일렉트릭(General electric)사의 연구소에서 처음으로 반도체 레이저가 발진되었으며 다른 형태의 레이저와 거의 비슷한 시기에 만들어졌다. 이때의 반도체 레이저는 펄스동작으로 액체질소에서 77 K로 냉각되어 발진시켰다. 1970년 8월 31일 미국 벨연구소에서 “한 알의 모래보다도 작고, 또 스트로보용 전원으로 100만 시간을 작동하는 반도체 레이저를 개발하였다” 라고 발표하였으며, 처음으로 반도체 레이저가 상온에서 연속 발진되었다. 반도체 레이저는 전류를 직접 레이저 빔으로 변환하는 것으로 기체 및 고체레이저의 구조 및 특성에서 다른 점을 나타낸다.

일반적인 레이저의 발진은 기체나 액체, 고체 상태의 매질에서 이루어지나 반도체 레이저는 P형과 N형을 접합한 다이오드에서 일어난다. P형과 N형 반도체와 P-N 접합의 에너지 준위를 Fig. 2.19에 나타내었다. Fig. 2.19의 (a)를 통해 반도체의 에너지띠는 전자가 꼭 차 있는 가전자대(valence band,  $E_V$ )와 전자가 존재하거나 존재할 수 있는 전도대(conduction band,  $E_C$ )로 구성되며, 가전자대와 전도대 사이가 에너지간격  $E_g$  만큼 떨어져 전자가 존재하지 않는 금지대 영역이 있다. N형 반도체는 공유결합 외에 1개의 과잉전자를 가지게 되는데, 이 전자가 자유 전자가 되어 전하의 운반자 역할을 한다. 과잉전자를 만드는 불순물을 도너(donor)라 하며 근소한 에너지를 받으면 과잉전자는 전도대로 올라가고 도너 원자는 양이온이 된다. 따라서 N형 반도체는 전도대( $E_C$ )로 올라갈 수 있고, 도너 에너지 준위( $E_D$ )는 전도대의 바로 아래에 위치한다. P형 반도체는 공유결합에서 전자가 모자란 상태이므로 이것이 정공이 되어 캐리어로써 작용한다. 이와 같이 정공을 만들기 위한 불순물을 억셉터(acceptor)라 하며 가전자대( $E_V$ ) 위에 억셉터 준위( $E_A$ )가 존재한다. 가전자대의 전자가 억셉터 준위로 올라가면 정공이 남게 된다. 전자와 정공의 에너지 분포가 대칭으로 되는 중심선에서 전자의 점유확률이 50 %가 되는 곳을 페르미준위( $E_F$ )라 할 때, N형 반도체는 전도대와 도너 준위 사이에 위치하며, P형 반도체는 가전자대와 억셉터 준위 사이에 존재하게 된다.

두 반도체가 접촉하여 P-N 접합이 이루어지면 Fig. 2.19의 (b)와 같이 N형 반도체에서 P형 반도체로 전자의 확산이 일어나고, P형에서 N형으로 정공이 이동하여 페르미에너지 레벨이 서로 같아진다. 즉, 동일한 에너지 레벨에서 전자가

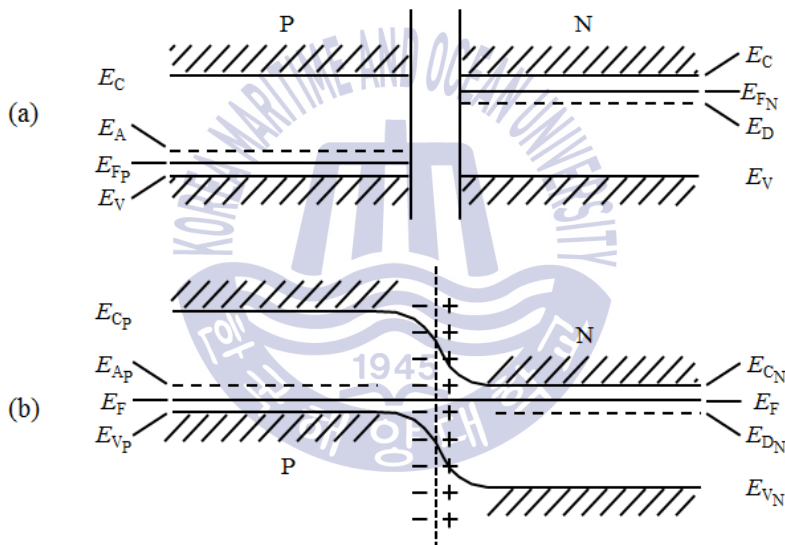


존재할 확률이 같아지며, N형과 P형 사이에 존재했던 전자와 정공의 불균일이 해결된다는 것을 의미한다. N형 반도체와 P형 반도체에서는 전자와 정공의 확산에 의한 이동으로 안정화되면서, 중성에서 (+), (-) 성분이 더해졌기 때문에 극성을 갖게 된다. N형의 접합부에는 양전하층이, P형 접합부에는 음전하층이 생겨 N에서 P방향으로 전계가 형성된다. 이 전계 때문에 전자와 정공이 더 이상 이동하지 못하며, 이러한 접합부위는 전하를 운반하는 캐리어가 고갈된 영역이라는 의미로 공핍영역(depletion region)이라고 한다. 이 상태에서 P쪽에 (+)극을 N쪽에 (-)극을 접촉시키면 N형 반도체 전자가 계속 공급되고 P형에서는 가전자가 (+)극으로 이동해 보다 많은 정공이 생성되므로 전류가 흐르게 되며 이를 순방향 바이어스(forward bias)라고 한다. 순방향 바이어스를 인가하면 Fig. 2.20에 나타난 것과 같이 양이온과 음이온이 감소하여 공핍층이 줄어들고 이 영역에서 전도대역의 전자는 가전자 대역의 정공과 재결합하여 전도대와 가전자대의 에너지 간격만큼 에너지를 방출하며, 이러한 방사를 재결합방사(recombination radiation)라 한다. Fig. 2.21에 보이듯이 문턱전류보다 낮게 전류를 가하면 자연방출에 의하여 적은 양의 결맞지 않은 빛(incoherence)을 내는 발광다이오드(LED : light emitting diode) 장치가 되지만, 여기전류를 증가시켜 문턱전류 이상이 되면 접합영역에서 반전분포(가전자대 중의 정공보다 전도대의 전자수가 더 많음)가 충분해져 유도방출이 발생하고 결과적으로 레이저 발진이 가능하게 된다. 레이저광의 강도는 정공과 전자의 재결합 크기에 따라 결정되므로 전류의 세기와 관련 있으며 전류가 증가할수록 빔의 세기는 급속히 상승한다. Fig. 2.22에 반도체 레이저의 기본 구조 모식도를 나타낸다. P와 N 반도체 사이에서는 아주 좁은 두께의 활성영역(active region)이 존재하고 이 영역은 전자와 홀을 포함한다. 공간전하영역이라고도 하며 반전분포가 형성되어 레이저 광이 방출한다.

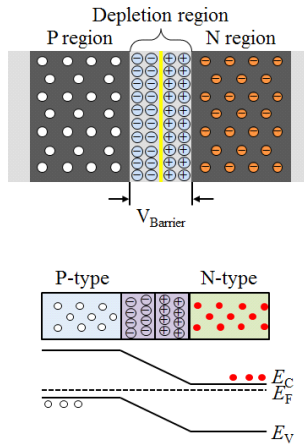
Fig. 2.23의 (a)에 나타난 것과 같이 일반 기체 및 고체 레이저는 에너지준위 사이의 에너지차인  $h\nu$ 에 해당하는 광자를 방출하는 것으로 발진파장의 폭이 극히 좁다. 반도체 레이저의 파장은 반도체 발광재료에 따라 정해지는 에너지간격에 의해 결정된다. 하지만 Fig. 2.23의 (b)와 같이 전도대의 전자밀도분포와 가전자대의 정공밀도분포를 나타내지만 전자와 정공의 재결합이 항상 전도대의 하단과 가전자대의 상단에서만 일어나는 것이 아니기 때문에 약간 큰 에너지간격에서



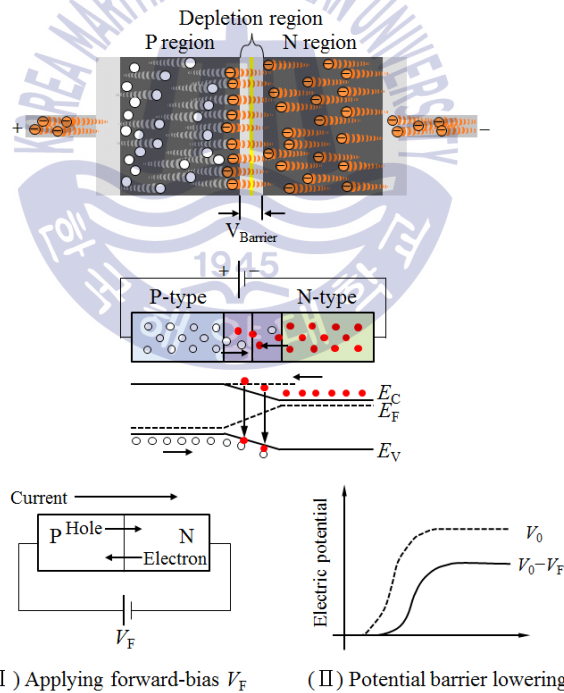
천이가 일어나고 천이에너지 자체에도 폭을 가지고 있어 레이저 발진파장의 폭 또한 넓어진다. 이뿐만 아니라 발진출력을 높이기 위해 여기전류를 증가시키면 반도체 레이저의 온도가 상승하면서 전자와 정공의 밀도분포가 더욱 넓어져 발진 파장의 범위가 넓어지는 것을 Fig. 2.24를 통해 확인할 수 있다. 따라서 반도체 레이저의 파장은 정해진 하나의 파장이 아니며 조건에 따라 변하여 어떤 범위를 갖는 것을 알 수 있다<sup>31-37</sup>.



**Fig. 2.19** Energy bands of P and N type semiconductor : (a) Separated P-type and N-type semiconductor, (b) The band structure and spatially fixed space-charge(indicated by + and -) in the P-N junction region



(a) Band structure of P-N junction



(b) P-N junction forward-bias

**Fig. 2.20** Mechanism of P-N junction diode laser

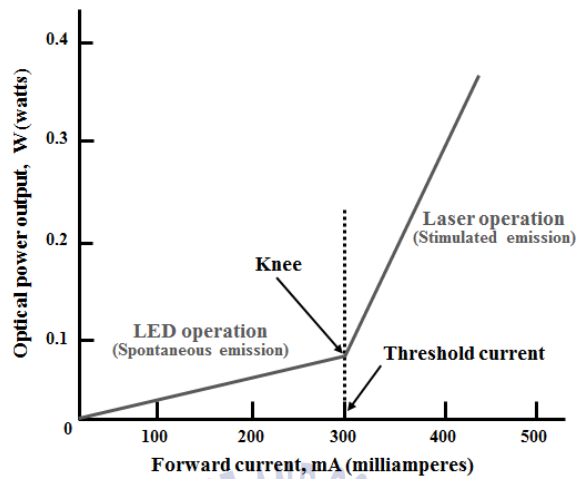


Fig. 2.21 Characteristic of diode laser power output by input current

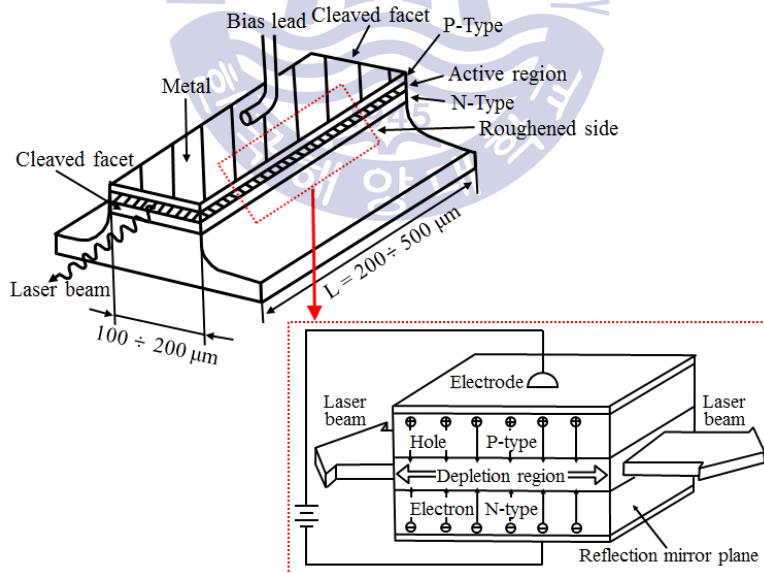
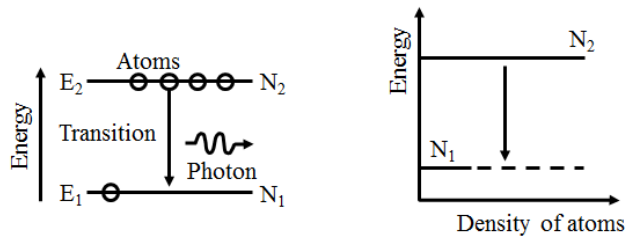
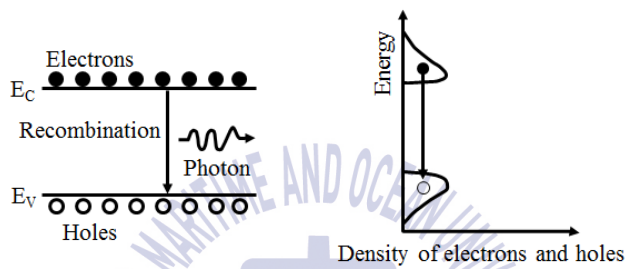


Fig. 2.22 Typical broad-area P-N homojunction laser



(a) General laser



(b) Diode laser

Fig. 2.23 Comparison of laser oscillation mechanism with diode and general laser

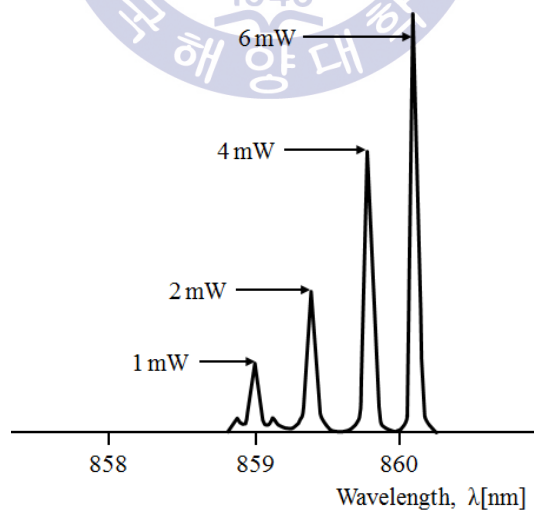


Fig. 2.24 Variation of wavelength according to oscillator power

### 2.3.2 다이오드 레이저의 특성

반도체 레이저는 활성층을 중심으로 양쪽에 에너지 구조가 다른 반도체를 겹쳐서 양쪽에서 둘러싼 더블 헤테로(double heterostructure)구조이다. 활성층은 밴드갭(반도체의 가전자대와 전도대의 에너지 차이)이 작은 반도체로, 그 주위는 밴드갭이 큰 N형 P형 반도체로 이루어져 있다. 레이저 발진이 일어나는 활성영역은 전형적으로  $1\mu\text{m}$ 로 크기가 아주 작기 때문에 회절현상으로 인해 다른 레이저에 비해 빛이 상대적으로 크게 발산한다. P-N 영역에서 수직방향으로  $45^\circ$ , 수평방향으로  $10\sim 20^\circ$  정도 발산하는 타원형의 빔을 Fig. 2.25에 확인할 수 있다. 수평방향으로는 실린드릭 렌즈, 수직방향은 마이크로 렌즈와 같은 왜곡 렌즈(빛의 진행 방향에 수직인 두 방향 각각에서 다른 배율을 갖는 렌즈)를 통하여 교정되지만 빔 품질(Beam parameter product, BPP)이  $1\sim 5\text{ mrad}$ 인  $\text{CO}_2$  레이저나  $1\sim 10\text{ mrad}$ 인 Nd:YAG 레이저보다 낮다.

하지만 반도체 레이저는 여러 가지 매력적인 특징을 갖는다. 전류가 직접 레이저 광으로 변화되므로 다이오드 레이저의 전기-광 변환효율은 약 20~30 %로 약 35 %의 효율을 가진 파이버 레이저와 비슷하며 10~15 %의  $\text{CO}_2$  레이저나 1~5 %의 Nd:YAG 레이저보다 우수하다. 다이오드 레이저의 이론적 효율은 최대 90 %까지 이지만 실제 가능한 최대 효율은 50 %정도이다. 또한 높은 효율로 인해 기존의 레이저에 비해 크기가 훨씬 더 작고 이동하기 쉬우며, 동작기계나 로봇 팔에 쉽게 설치할 수 있다. 이뿐만 아니라 다이오드 레이저의 파장은 반도체 재료, 온도, 전류에 따라 변화한다. Table 2.5에 적외선 반도체 레이저에 주로 사용되는 재료의 파장 범위를 나타내고 있다. 온도가 상승하면 전자와 정공의 밀도분포가 더욱 넓어지기 때문에 발진 가능한 파장의 범위도 넓어지게 된다. 또한 여기전류를 증가시키면 레이저 활성층의 온도가 올라가고, 이에 따라 에너지간격이 줄어들어 발진파장이 긴 쪽으로 이동하게 된다. 따라서 온도  $1^\circ\text{C}$  당  $0.4\text{ nm}$ , 전류  $1\text{ mA}$  당  $0.025\text{ nm}$  정도 변화한다. 그러므로 기존의 레이저보다 더 넓은 파장밴드(wavelength band)를 가지며,  $10.6\mu\text{m}$  파장의  $\text{CO}_2$  레이저나  $1.064\mu\text{m}$ 의 Nd:YAG 레이저,  $1.075\mu\text{m}$ 의 파이버 레이저보다 파장이 짧아 일반적으로 재료의 반사율이 더 낮다.

다이오드의 수명은 일반적으로 4,000~5,000시간, 최대 10,000시간 정도로 예상 수명이 다른 재료가공용 레이저보다 짧다는 문제점이 있지만 유지 및 운영비용이

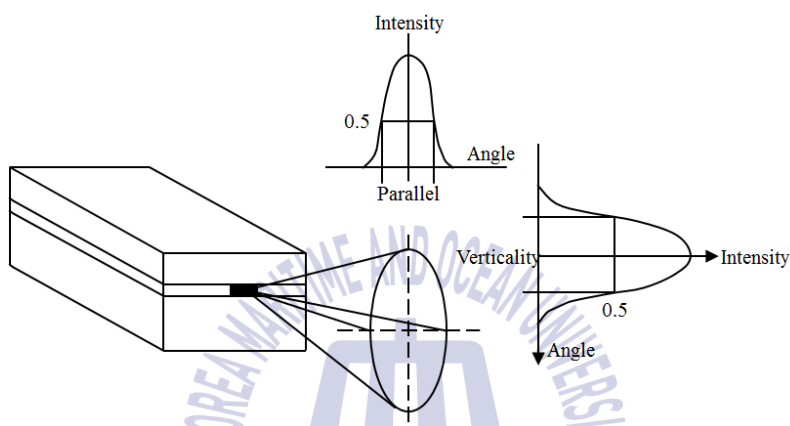
적으며, CO<sub>2</sub> 레이저와 Nd:YAG 레이저의 정비주기가 1,000시간인데 비해 다이오드 레이저는 20,000시간으로 주기가 상당히 길다.

이러한 특징을 가진 다이오드 레이저의 출력이 수 밀리와트일 경우, 광파이버 통신용 광원, 디지털·오디오·디스크(CD, DVD)나 레이저 프린터의 광원으로써 많이 사용되고 있다. 고출력화가 이루어지면서 재료 가공에도 적용되기 시작했으며 낮은 빔 품질로 인해 절단이나 고속 심용입 용접에는 적합하지 않기에 주로 표면 경화, 솔더링, 브레이징, 클래딩, 용접 등에 사용되고 있다<sup>31-37)</sup>.

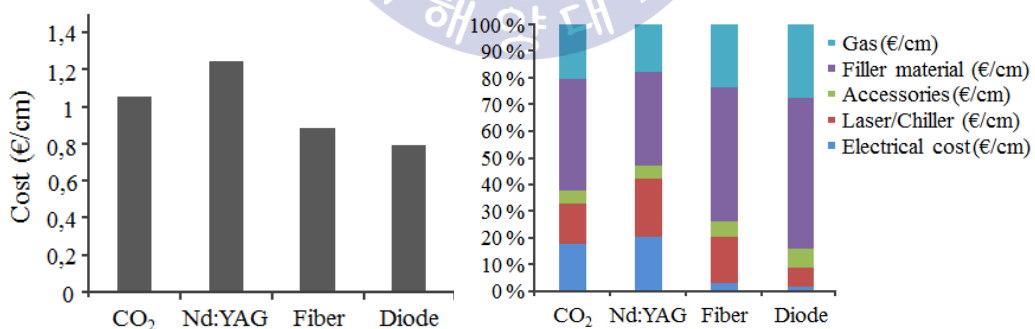
Fig. 2.26을 통해 레이저 클래딩 시 다이오드 레이저가 가장 효율적인 열원이라는 것을 확인할 수 있다. Fig. 2.26의 (a)는 클래드 층 길이 1 cm마다 레이저 열원의 비용으로 다이오드 레이저는 약 0.80 €/cm이나 Nd:YAG 레이저는 약 1.25 €/cm로 다이오드 레이저보다 56.2 % 더 증가하는 것을 나타낸다. 다이오드 레이저로 클래딩 시 비용이 상대적으로 저렴한 이유에는 먼저, 파장이 비교적 짧아 공급 재료의 빔 흡수율이 높으며, 레이저 열원의 효율이 높고 가격이 저렴하다는 것이다. 하지만 다이오드 레이저 특성 상 빔 품질이 낮기 때문에 폭이 작은 클래드 층을 형성하는 데는 적절하지 않다. 이러한 문제를 보완하기 위해서 레이저 열원의 효율과 금속 재료의 빔 흡수율이 우수한 파이버 레이저 또는 1kW당 가격이 저렴하고 적절한 효율을 가진 CO<sub>2</sub> 레이저가 다이오드 레이저를 대체할 수 있다. 반면, Nd:YAG 레이저는 효율이 낮으며 운영비에 있어서도 높은 전기 사용료로 레이저 클래딩에서 가장 적절하지 않은 열원이다<sup>25)</sup>.

**Table 2.5** Wavelength of a selected range of diode laser materials

Materials	AlGaAs	InGaAs	AlGaInP
Wavelength(nm)	720~880	940~990	630~690



**Fig. 2.25** Beam divergence and intensity distribution of diode laser



(a) Cost per coating centimeter

(b) Percentage influence of each cost to the total cost

**Fig. 2.26** Comparison of cost of the laser cladding of aluminum with different laser



## 제 3 장 실험 방법

### 3.1 실험 재료와 장치

#### 3.1.1 실험 재료

본 연구에 사용된 모재는 선박엔진 밸브용 내열강 SNCrW이다. Table 3.1과 Table 3.2에 모재의 화학적 조성, 물리적 특성 및 인장특성을 나타낸다. 내열강은 500 °C에서 최대 750 °C까지의 온도 범위에서 사용될 수 있는 합금강으로, 고온 강도, 내산화성, 내마모성, 고온피로강도가 우수하다. 내열강에서 가장 중요한 합금 원소는 내산화성을 위한 Cr과 강도 및 연성을 위한 Ni이다. Cr은 모든 내열강에 포함되는 원소로 고온 강도와 침탄 방지뿐만 아니라 10 % 이상 첨가 시 내산화성 및 내황화성 또한 개선시킨다. Ni은 Fe 및 Cr과 함께 사용되어 연성, 고온 강도를 증가시키며 질화와 침탄을 방지한다. 오스테나이트계 내열강에서는 Ni이 최소 8 %이상 첨가된다. 그리고 Mn, Mo, W, Cu와 같은 원소의 첨가로 인해 고온에서 강의 특성을 개선시킨다. 이외에도 비금속 원소인 Si은 고온에서 내열강의 산화와 침탄 방지 및 질화를 방지하며, S의 경우 함량이 0.010 % 이하로 제한되지만 기계 가공성을 향상시킨다<sup>38)</sup>.

클래딩시 사용된 분말은 총 2종류의 Co계 합금 분말로 stellite 6번과 동일한 조성인 EuTroLoy 16006과 W과 C 함량의 차이가 있는 LC-190이다. 2 종류 분말의 화학적 조성과 기계적 특성을 Table 3.3과 Table 3.4에 각각 나타낸다. LC-190 분말은 EuTroLoy 16006 보다 더 많은 텅스텐 양이 첨가되어 있다. 일반적으로 Co는 Cr과 함께 사용되어 고온 강도 및 고온 경도를 크게 증가시키는 특성을 가진다. 따라서 stellite는 Co에 Cr 및 W 등을 섞은 내열성 합금으로 경질이고 내마모성, 내식성, 내고온 산화성이 뛰어나며, 내열성이 우수해 600 °C 이상에서도 경도의 저하를 나타내지 않는 특성이 있다. Stellite의 종류로는 1, 6, 12, 21, 31 번등으로, stellite 6번이 가장 범용적으로 사용되고 있다<sup>39-41)</sup>.

실험에 사용된 SNCrW 시험편은 원형의 형태로, 지름 115 mm, 두께 20 mm<sup>t</sup>이다. Fig. 3.1에서 시험편의 형상 및 치수를 나타낸다. 가스 분사법(gas atomization)

으로 제조된 EuTroLoy 16006은 둥근형이나 불규칙 형상을 나타내며 그 크기도 53~150  $\mu\text{m}$  범위를 가진다. LC-190 또한 둥근 형상을 나타내며, 78~211  $\mu\text{m}$  범위의 입자 크기를 가진다. Fig. 3.2에서 2 종류 분말의 형상 및 크기를 확인할 수 있다.

**Table 3.1** Chemical composition of SNCrW

Element(%) Material	C	Ni	Mn	Cr	Si	W	P	S	Mo	Cu	Fe
SNCrW	0.257	9.996	0.952	19.958	0.969	2.012	0.028	0.0028	0.14	0.275	Bal.

**Table 3.2** Physical constants and tensile strength of SNCrW

Density (g/cm <sup>3</sup> )	Melting point (°C)	Tensile strength (MPa)	Yield strength (0.2 % offset, MPa)	Elongation (%)	Reduction area (%)
7.7	1425	750	395	39.0	45.0

**Table 3.3** Chemical composition and mechanical properties of EuTroLoy 16006

Element(%) Material	C	Ni	Cr	Si	W	Fe	Co	Flow rate (sec/50 g)	Apparent density(g/cm <sup>3</sup> )	Hardness (HRC)
EuTroLoy 16006	1.1	1.7	28.0	1.2	3.9	1.5	Bal.	15.0	4.6	42 (2nd layer-welded)

**Table 3.4** Chemical composition and mechanical property of LC-190

Element(%) Material	C	Ni	Cr	Si	W	Fe	Mn	Co	Flow rate (sec/50 g)	Apparent density (g/cm <sup>3</sup> )
LC-190	3.17	1.6	26.8	0.8	14.9	2.0	0.4	Bal.	13.0	5.0

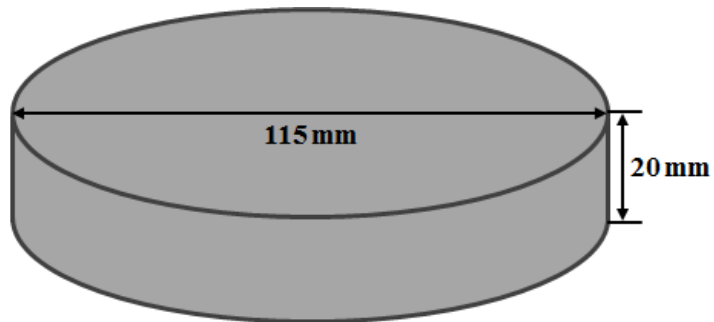
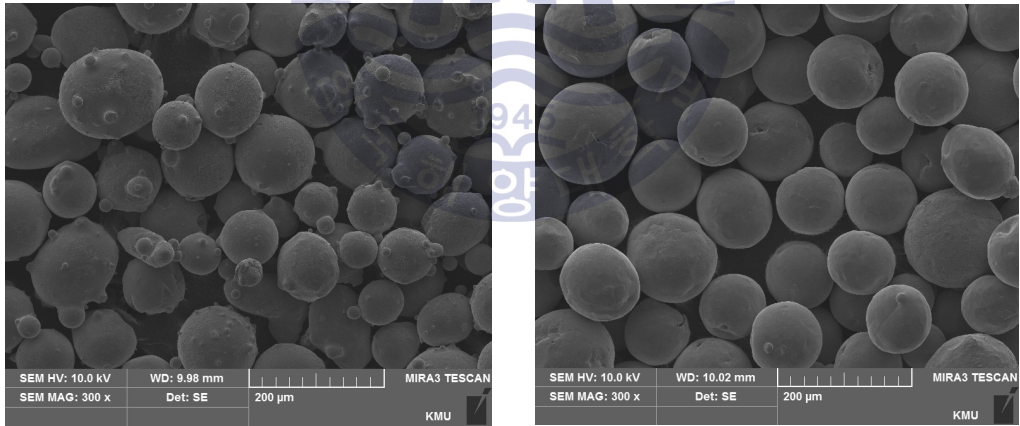


Fig. 3.1 Appearance and dimension of substrate



(a) EuTroLoy 16006

(b) LC-190

Fig. 3.2 Shape of as-received powders for laser cladding

### 3.1.2 실험 장치

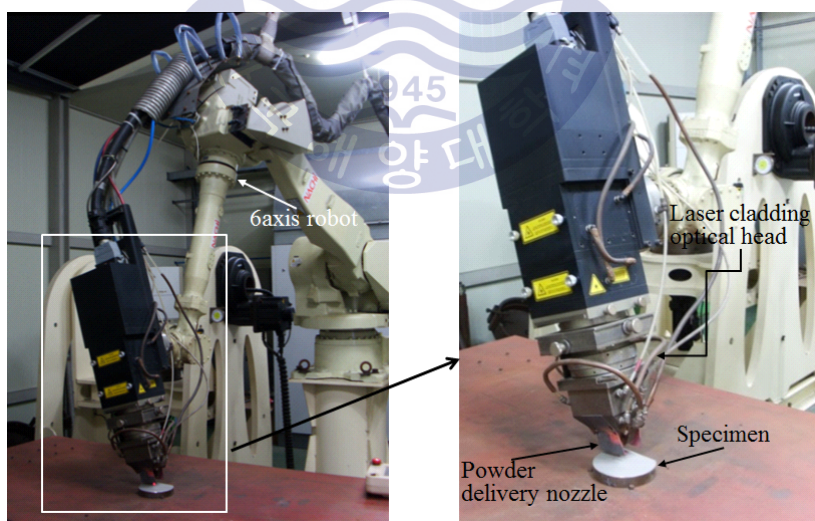
본 연구에서 사용된 클래딩 장치는 크게 최대 출력 8 kW의 CW(continuous wave) 고출력 다이오드 레이저(HPDL, high power diode laser), 분말 공급 장치, 6축 제어 로봇의 3가지로 구성된다. 사용한 다이오드 레이저는  $975 \pm 10$  nm의 파장대를 가진다. 레이저 광학계와 클래딩용 광학헤드를 로봇에 장착하였으며, 시험편은 테이블에 고정시켜 로봇이 이동하면서 레이저 빔이 조사되는데, 레이저 공진기(resonator)로부터 나오는 레이저 빔은 광파이버(optical fiber)를 경유하여 로봇에 부착된 광학헤드로 전송된다.

클래딩이 진행되는 동안 산화를 방지하기 위해 불활성 가스인 아르곤을 사용하였으며, 클래딩용 광학헤드 내부에 실드가스 노즐을 설치하여 레이저와 동축으로 실드가스를 공급하여 용융풀을 보호하였다. 또한 분말 공급 장치로부터 이송가스와 함께 분말이 공급되었으며 광학헤드 내부에 분말 공급 노즐을 장착하였다. 따라서 레이저와 분말, 이송가스 및 실드가스 모두 동일한 방향을 향해 공급된다. 레이저의 주된 사양을 Table 3.5에 정리하여 나타내었으며, 클래딩 장치 및 실험 진행 사진을 Fig. 3.3에 나타낸다.



**Table 3.5** Specification of HPDL

Laser type	CW diode laser
Maker	Coherent
Model	HighLight 8000D
Wave length	$975 \pm 10$ nm
Output power	$\geq 8,000$ W
Power stability	$\leq 2$ %/hour
Wall plug efficiency	$> 50$ %
Cooling type	Water cooling



**Fig. 3.3** Setup of experimental equipment in laser cladding

## 3.2 실험 및 분석 방법

### 3.2.1 실험 방법

본 연구에서는 Fig. 3.4에 나타내듯이 분말 공급 방식의 레이저 클래딩을 이용하여 조사되는 레이저 빔은  $6 \times 6$  mm인 사각빔(rectangular beam)으로 균일한 파워밀도 분포를 가진다. 실험은 1 패스(one-pass) 클래딩 실험을 통해 주된 공정 변수에 따른 클래드 층의 형상과 희석률에 미치는 영향을 파악한 후 넓은 면적에 멀티 패스 클래드 층을 형성하기 위한 중첩(overlapping) 실험과 높게 쌓아 올리기 위해 필요한 적층(multi-layer) 실험을 실시하여 클래드 층의 특성을 평가하였다. 또한 다른 종류의 분말을 이용하여 클래딩 후 그 특성을 비교·분석하였다.

EuTroLoy 16006 분말을 사용하여 1 패스, 중첩 및 적층 클래딩을 실시하였다. Fig. 3.5는 본 연구에서 형성한 클래드 층을 나타낸 것으로, 1 패스 클래드는 하나의 클래드 층을 형성한 것이며, 멀티 패스 클래드는 총 6개의 클래드 층을 동일한 방향으로 중첩하여 형성하였다. 우선 1 패스 클래딩에서 주된 공정 변수인 레이저 출력(laser power,  $P$ ), 이송 속도(traveling speed,  $v$ ), 분말 공급 속도(powder feed rate,  $R_p$ )를 변화시켜 클래드 층의 형상과 희석률에 미치는 영향을 파악하였다. 출력과 이송 속도 및 분말 공급 속도에서 일정한 조건을 설정하고, 그 조건을 토대로 실드가스(shield gas,  $G_s$ )와 이송가스(carrier gas,  $G_c$ )로 사용되는 Ar의 유량에 따른 클래드 층의 특성 변화를 확인하였으며 모재의 표면 조도를 변화시켜 그에 따른 클래드 층의 차이를 알아보았다. 그리고 1 패스 클래딩 실험을 통해 클래드 층 높이가 1 mm가 되는 조건을 선정하여 중첩 실험과 적층 실험을 실시하였다. 중첩 실험시 빔 사이즈와 클래드 층의 폭의 길이 중에서 중첩률(overlapping ratio) 기준을 정하기 위하여 실험을 진행하였다. 또한 동일한 중첩률 조건에서 분말 공급량을 증가시켰을 때의 클래드 층에서의 발생하는 차이를 비교하였다. 적층 실험은 균일한 클래드 층의 표면을 얻기 위해 적층 시작 위치를 변화시켜 클래드 층의 형상 변화를 확인하였다. 실험 전, 모든 시편은 메틸 알콜(methyl alcohol)을 이용하여 표면 탈지 후, 샌드블라스트(sand blast) 처리하여 표면 오염물질을 한 번 더 제거하면서 표면의 거칠기를 일정하게 하였다.



동일한 코발트계 분말일지라도 텅스텐 함량에서 차이가 나기 때문에, 분말에 따른 클래드 층의 특성을 파악할 필요가 있어 클래드 분말을 달리하여 클래딩을 실시하였다. 따라서 LC-190 분말을 이용하여 주된 공정 변수에 따른 1 패스 및 멀티 패스 클래딩을 하였으며 클래드 층의 형상 및 결함, 특성을 비교·분석하였다. 실험 후 얻어진 클래드 층은 형상 및 경도 측정, 성분 분석, 미세조직 관찰을 실시하여 기계적 및 조직적 성질을 분석하였다.

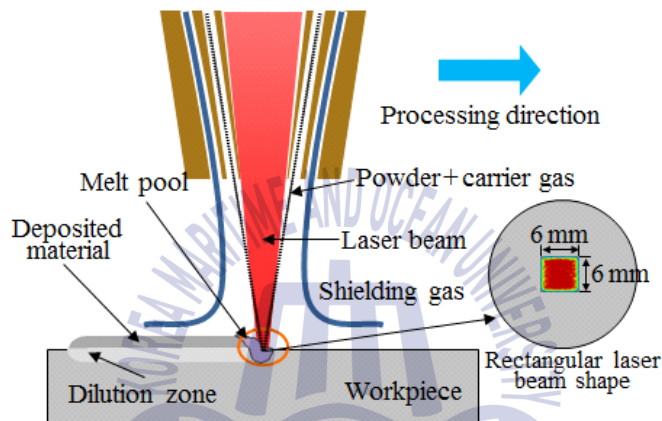


Fig. 3.4 Schematic of laser cladding and laser beam shape

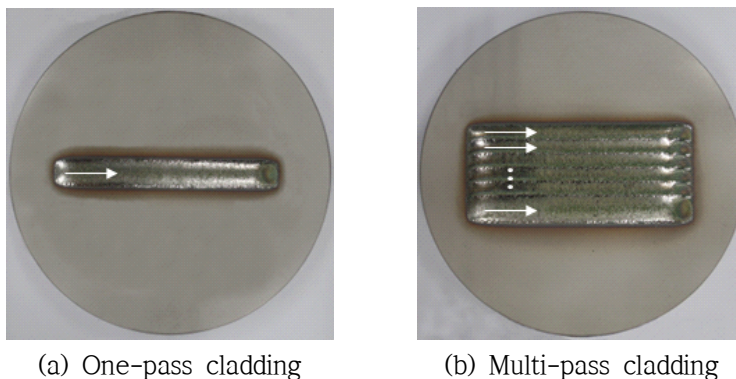


Fig. 3.5 Photos of clad layer

### 3.2.2 분석 방법

#### (1) 시편의 채취 및 준비

클래딩한 재료는 표면 형상을 관찰하기 위해 표면사진을 찍은 후, 단면분석을 위해 와이어커팅으로 정밀 절단하였다. 레이저 조사 초기에는 일시적으로 출력이 불안정할 수 있으므로 샘플링(sampling)하기에는 적절하지 않다. 따라서 단면 관찰용 시험편은 재현성을 확보하기 위해 클래드 층이 안정적으로 얻어졌다고 판단되는 지점 즉, 시편의 시작부분에서 클래딩 진행 방향으로 20 mm 떨어진 지점부터 10 mm, 15 mm, 10 mm의 간격으로 3개의 시험편을 채취하였다. 채취된 시험편은 연마(grinding and polishing)와 에칭(aqua regia,  $\text{HCl} : \text{HNO}_3 = 3 : 1$ )의 단계를 거쳐 분석시편을 준비하였다. 분석시편을 이용하여 클래드 층의 폭(width,  $w$ )과 높이(height,  $h$ )를 측정하였으며 전체 용융 면적과 클래드 층의 면적 및 모재 용융 면적을 측정하여 클래드 분말의 용융 정도와 희석률(dilution ratio,  $D$ )을 확인하였다. 희석률은 클래드 층의 품질을 평가할 수 있는 중요한 요인으로, 전체 용융면적에 대한 모재의 용융부의 비율로 정의하였으며 모재의 용융 정도를 의미한다<sup>2,24</sup>. Fig. 3.6과 Fig. 3.7에 시험편 채취 위치와 클래드 층 단면 측정 위치를 나타낸다.

#### (2) 경도분포 측정

경도는 마이크로 비커스 경도기(Micro vickers hardness tester)를 사용하여, 1 패스 클래딩의 경우 횡단면에서 종방향(longitudinal-direction)으로, 멀티 패스 및 적층된 클래드 층에서는 종방향과 횡방향(transverse-direction)으로 나누어 측정하였다. EuTroLoy 16006 분말로 얻어진 클래드 층의 하중은 압흔(indentation)의 크기를 고려하여 490.3 mN(Hv 0.05)으로, LC-190 분말의 경우 980.6 mN(Hv 0.1)으로 설정하였다. 측정위치는 Fig. 3.8에 나타난 것과 같이 종방향 경도의 경우 클래드 층 표면에서 15  $\mu\text{m}$  아래 부분을 60  $\mu\text{m}$ 간격으로 측정하였으며 횡방향은 1층 멀티 패스 클래드 층 표면에서부터 높이가 1/3, 2/3만큼 떨어진 지점과 2층 멀티 패스 클래드 층 표면에서부터 1 mm 아래 부분과 중간높이에서부터 50  $\mu\text{m}$  간격으로 측정하였다.

### (3) 미세조직 관찰 및 성분 분석

미세조직은 광학현미경(Optical microscopy, OM)을 사용하여 클래드 층과 경계층, 모재의 조직을 관찰하였다. 또한 부위별 조직의 성분을 분석하기 위하여 EDS (Energy-dispersive X-ray spectroscopy) 점분석(dot scanning) 및 선분석(line scanning)으로 원소의 분포 및 경향을 파악하였다. 그리고 중첩부 및 적층부에 조직 차이가 나타나는 부분을 정밀하게 분석하기 위하여 EPMA(Electron probe micro-analysis)를 이용하여 면분석(mapping)으로 원소 분포를 파악하고자 하였다.

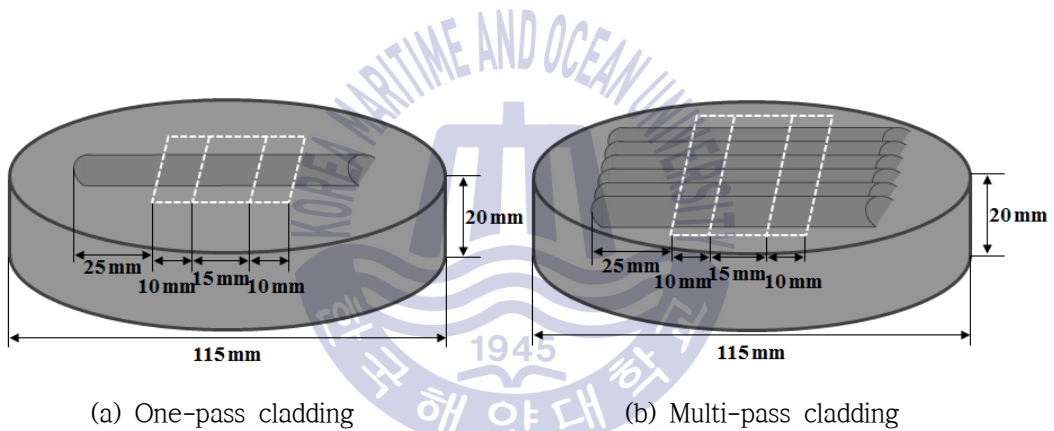


Fig. 3.6 Position of sampling for observing cross section

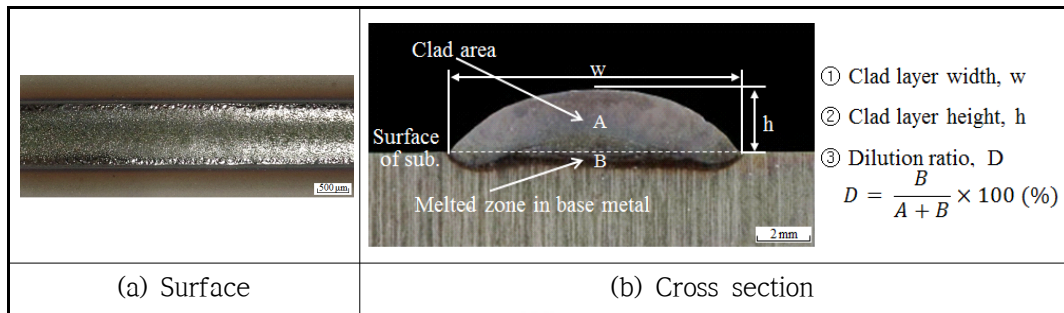


Fig. 3.7 Sampling of clad layer

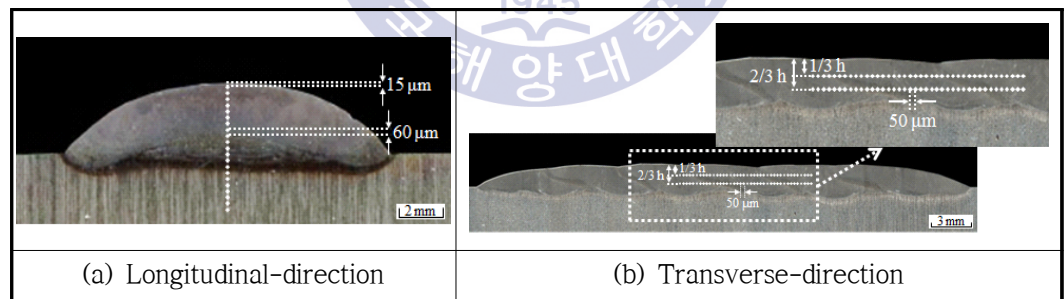


Fig. 3.8 Measurement position for hardness test

## 제 4 장 실험 결과 및 고찰

### 4.1 1 패스 클래드 층의 특성에 미치는 공정변수의 영향

#### 4.1.1 레이저 출력 및 빔 이송속도

크기가 크고 수리 면적이 넓은 부품을 레이저 클래딩 시, 클래드 층의 중첩은 필수적이다. 그러므로 중첩 전 공정변수에 따른 1 패스 클래드 층의 기본적인 특성 파악이 선행되어야 한다. 레이저 클래딩의 주요 공정변수는 레이저 출력( $P$ ), 빔 이송속도( $v$ ) 및 분말 공급량( $R_f$ )으로 이러한 변수에 의해 재료에 가해지는 입열량이 결정되며, 그 변화에 따라서 클래드 층의 폭과 높이 및 희석률이 달라진다. Table 4.1은 stellite 6 분말을 이용한 레이저 클래딩에서 출력과 빔 이송속도, 분말 공급량이 증가할 때 클래드 층의 형상 및 특성에 미치는 영향을 나타내었다.

1 패스 클래딩 시 이송속도를 2 mm/s, 4 mm/s, 6 mm/s로 설정하고, 레이저 출력을 1.0~5.0 kW까지 1.0 kW 단위로 변화시키면서 클래딩을 실시하였다. Fig. 4.1과 Fig. 4.3, Fig. 4.5에 각각의 이송속도별 레이저 출력변화에 따른 클래드 층 표면 및 단면사진을, Fig. 4.2과 Fig. 4.4, Fig. 4.6에 클래드 층 폭( $w$ ) 및 높이( $h$ ), 희석률( $D$ ) 변화 그래프를 나타낸다. 모든 속도조건에서 출력이 1 kW일 때 적은 입열로 인해 클래딩이 이루어지지 않은 것을 확인할 수 있다. 2.0~5.0 kW의 범위에서 출력이 증가할수록 클래드 층의 폭이 넓어지고 높이가 낮아지며 모재의 용융깊이가 깊어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 출력이 증가할수록 단위시간 당 입열량이 증가하여 분말과 모재가 충분히 용융되면서 용액의 퍼짐성이 좋아졌기 때문이다. 실험에 사용된 레이저는 탑햇(top-hat) 파워밀도 분포를 가지는  $6 \times 6$  mm 크기의 사각 빔이다. 따라서 빔 가장자리에서도 분말과 모재를 용융시킬 수 있을 정도의 충분한 에너지를 가지기 때문에 모든 속도 및 출력조건에서 클래드 층의 폭은 6 mm 이상이였다<sup>26)</sup>. 그리고 빔 이송속도가 2 mm/s일 때를 제외하고 출력이 증가할수록 폭의 증가 정도에 비해 높이 감소폭은 상당히 미미하여 단면상으로는 높이 차이를 뚜렷하게 확인하기 어려웠다. 모든 출력조건에서 2 mm/s의 경

우 2 mm 이상의, 4 mm/s는 1 mm, 6 mm/s에서는 0.7 mm 이상의 높이를 가진 클래드 층을 형성할 수 있었다. 출력의 증가는 클래드 층의 높이 변화에 큰 영향을 미치지 않지만 모재의 용융면적과 용융깊이 증가에는 상당한 영향을 주기 때문에 희석률 변화폭에 있어서, 이송속도가 증가할 때 보다 훨씬 더 크게 증가한다. 빔 이송속도의 변화는 재료와 레이저 빔과의 반응시간뿐만 아니라 단위 길이 당 분말 공급량의 변화로 이송속도가 증가할수록 클래드 재료가 흡수하는 에너지의 양이 감소하여 클래드 층의 폭과 높이는 낮아지고 희석률은 증가하는 것을 알 수 있다.

**Table 4.1** A summary of the effect of an increase in various process variables on the clad geometry and its properties

Process variables	Height	Width	Dilution / penetration	Root angle	Hardness
Laser power( $P$ ) ▲	▼	▲	▲	▲	▼
Traveling speed( $v$ ) ▲	▼	▼	▲	▲	▼
Powder feed rate( $R_p$ ) ▲	▲	▼	▼	▼	▲

\*. ▲ or ▼ : Increase or decrease of physical value



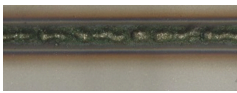
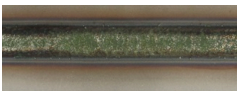

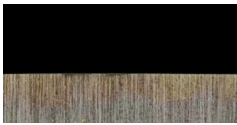


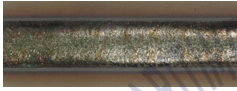



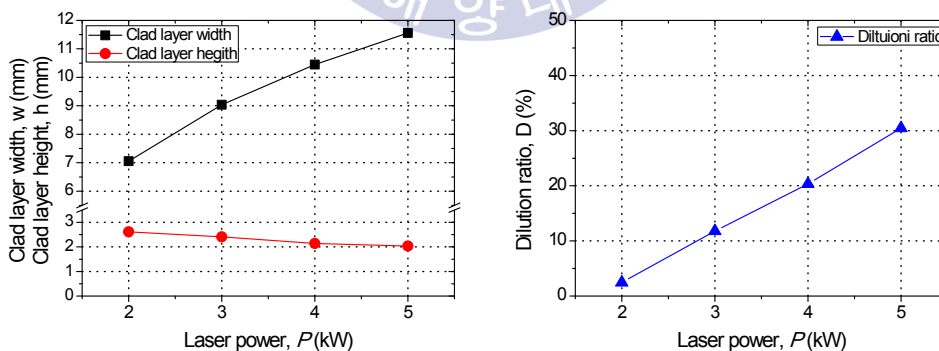
SNCrW - Stellite 6, One-pass clad ; $v : 2 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_s : 20 \text{ l/min(Ar)}$ , $G_c : 8 \text{ l/min(Ar)}$			
$P \text{ (kW)}$	1 kW	2 kW	3 kW
Clad layer			
Surface			
Cross section			
$P \text{ (kW)}$	4 kW	5 kW	X
Clad layer			
Surface			
Cross section			

Fig. 4.1 Surface and cross section of clad with laser power in  $v = 2 \text{ mm/s}$



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )

(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.2 Variation of clad characteristics of Fig. 4.1

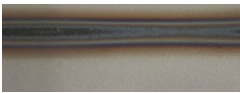

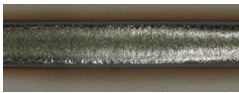
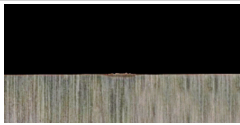



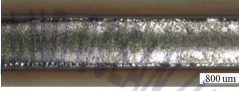

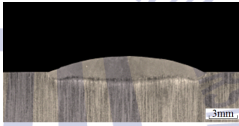
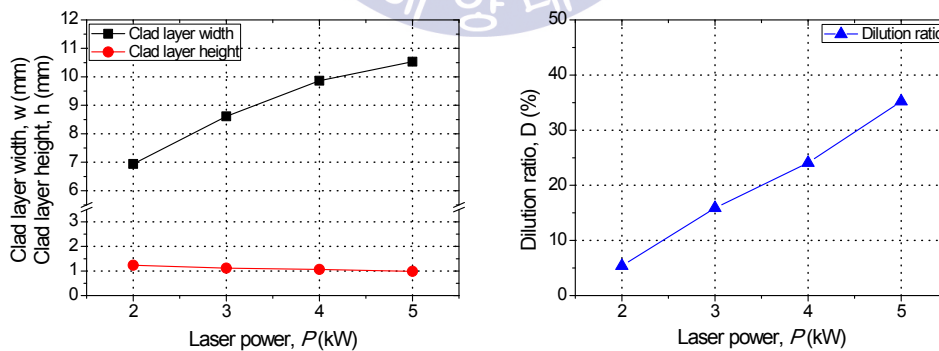
SNCrW - Stellite 6, One-pass clad ; $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_s : 20 \text{ l/min(Ar)}$ , $G_c : 8 \text{ l/min(Ar)}$			
$P \text{ (kW)}$	1 kW	2 kW	3 kW
Clad layer			
Surface			
Cross section			
$P \text{ (kW)}$	4 kW	5 kW	X
Clad layer			
Surface			
Cross section			

Fig. 4.3 Surface and cross section of clad with laser power in  $v = 4 \text{ mm/s}$



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )

(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.4 Variation of clad characteristics of Fig. 4.3

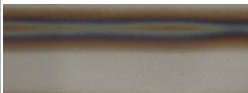









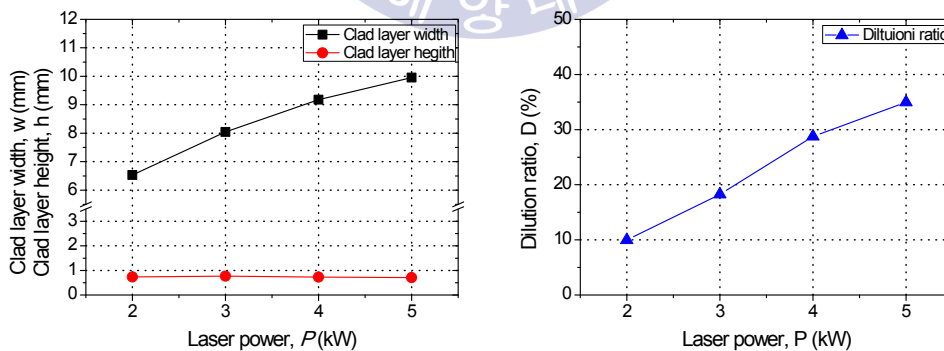
SNCrW - Stellite 6, One-pass clad ; $v : 6 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim 20 \text{ g/min})$ , $G_s : 20 \text{ l/min(Ar)}$ , $G_c : 8 \text{ l/min(Ar)}$			
$P \text{ (kW)}$	1 kW	2 kW	3 kW
Clad layer			
Surface			
Cross section			
$P \text{ (kW)}$	4 kW	5 kW	X
Clad layer			
Surface			
Cross section			

Fig. 4.5 Surface and cross section of clad with laser power in  $v = 6 \text{ mm/s}$



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )

(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.6 Variation of clad characteristics of Fig. 4.5

#### 4.1.2 분말 공급량

레이저 출력과 빔 이송속도에 따른 실험을 통해 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s 일 때 높이 약 1 mm, 폭 약 10 mm의 클래드 층을 얻을 수 있었다. 이와 동일하게 레이저 출력과 빔 이송속도를 설정하였으며 분말 공급량( $R_f$ )을 제외하고 나머지 공정변수 또한 동일하게 유지하였다. 분말 공급 장치는 분말이 담겨져 있는 용기와 작은 구멍이 있는 회전판으로 구성되어 있으므로, 본 실험에서는 분말 공급량을 단위 시간당 판의 회전수를 조절하여 1~5 rpm까지 1 rpm 간격으로 변화시켰다(분말 공급 시스템의 원리 참조). 판의 회전수에 따른 단위 시간당 분말 공급량을 따로 측정한 결과, 1 rpm일 때 7~8 g/min, 2 rpm의 경우 14~15 g/min, 3 rpm은 19~20 g/min, 4 rpm은 26~27 g/min, 5 rpm에서 32~33 g/min이었다. Fig. 4.7과 Fig. 4.8은 분말 공급량 변화에 따른 표면 및 단면 사진과 클래드 층의 폭 및 높이, 희석률의 변화 그래프를 나타낸다. 분말 공급량의 증가는 식 (1)의 분말 밀도의 증가 즉, 단위 시간 및 단위 면적 당 공급되는 분말량이 많아지는 것으로 분말에 흡수되는 에너지가 증가하여 모재에 흡수되는 에너지의 양이 감소하게 된다.

$$\text{Powder density} = \frac{\text{powder feed rate}(R_f)}{(\text{beam diameter}(d) \times \text{traveling speed}(v))} \quad (1)$$

따라서 단면 사진 상 용융된 분말의 면적은 증가하나 모재의 용융면적은 감소하게 되어 희석률이 감소한다. 그리고 클래드 층의 높이는 증가하며 모재의 용융 깊이가 감소하였으며 폭은 거의 변화하지 않았으나 4 rpm에서 약 0.4 mm 감소하였다. 이는 출력은 일정하고 26~27 g/min 이상으로 공급되는 분말량이 증가할 때, 분말에 흡수되는 에너지는 한정적이기 때문에 분말 용액의 퍼짐성이 감소한 것으로 사료된다. 재료의 입열량을 결정하는 주요 변수인 레이저 출력, 빔 이송속도, 분말 공급량 중 클래드 층 높이와 희석률에 가장 큰 영향을 미치는 변수가 분말 공급량이라는 것 또한 확인할 수 있다. 본 실험에서는 모든 분말 공급량 조건에서 결함이 없으며 모재와 금속적으로 완전히 결합한 클래드 층을 얻을 수 있었지만 5 rpm보다 판의 회전속도를 빠르게 하여 분말 공급량이 32~33 g/min 보다 증가할 때, 레이저 빔 대부분의 에너지가 분말에 흡수되어 분말의 충분한 용융 및 모재와의 완전한 접합이 일어나지 못하여 박리나 기공이 발생할 수 있다고 판단된다.







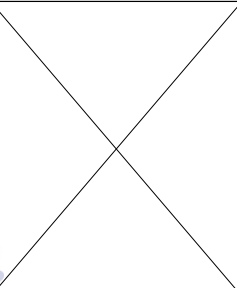
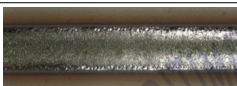

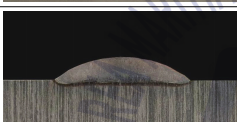
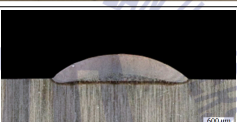
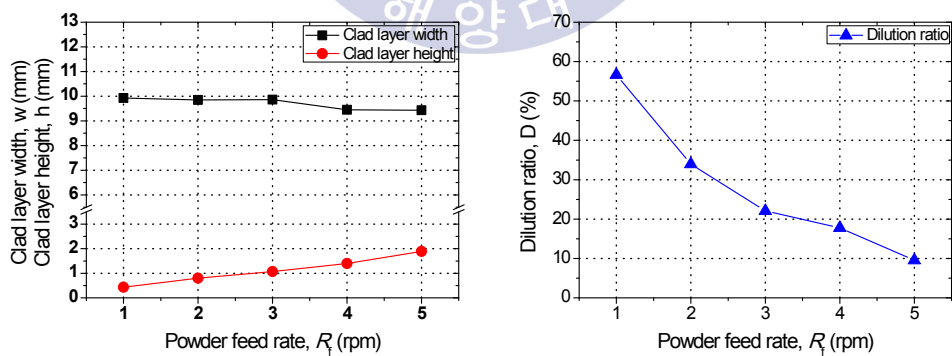
SNCrW - Stellite 6, One-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $G_S : 20 \text{ l/min(Ar)}$ , $G_C : 8 \text{ l/min(Ar)}$			
$R_f \text{ (rpm)}$ Clad layer	1 rpm (7~8 g/min)	2 rpm (14~15 g/min)	3 rpm (19~20 g/min)
Surface			
Cross section			
$R_f \text{ (rpm)}$ Clad layer	4 rpm (26~27 g/min)	5 rpm (32~33 g/min)	
Surface			
Cross section			

Fig. 4.7 Surface and cross section of clad with powder feed rate



(a) Clad layer width(w) and height(h)

(b) Dilution ratio(D)

Fig. 4.8 Variation of clad characteristics of Fig. 4.7

### 4.1.3 실드가스(Ar) 유량

고온에서 액상으로 존재하는 용융금속은 대기 중의 활성기체와 반응하기 쉬우므로 용융금속에 실드가스를 공급하여 대기 중의 반응하기 쉬운 기체들을 차폐시켜야 한다. 레이저 클래딩 시 사용되는 실드가스는 산화 방지뿐만 아니라 노즐로부터 나오는 분말의 흐름을 형성하기 때문에 셰이핑가스(shaping gas)라고도 불린다. 주로 사용되는 실드가스로는 아르곤(Ar) 및 헬륨(He) 가스가 있으며 아르곤은 공기보다 약 1.4배 무거우나 헬륨은 약 0.14배 정도 가볍다. 따라서 용융금속을 보호한다는 관점에서 아르곤 가스가 더 효율적이라고 할 수 있으며 헬륨 가스를 공급하여 같은 정도의 보호 효과를 얻으려면 2~3배 정도의 유량이 더 필요하게 된다<sup>16)</sup>. 본 실험에서는 실제 산업에서 가장 많이 사용되고 있는 아르곤 가스를 공급하여 건전한 클래드 층을 형성하기 위한 최적의 유량을 선정하고자 하였다. 이전의 분말 공급량 변화 실험은 4 kW의 출력 조건에서 진행하였으나 실드가스 유량 변화 실험에서는 입열량이 클 때 용융금속 간 대류 현상이 더욱 활발히 일어나므로 가스 유량에 대한 차이를 안정적으로 확인하고자 출력을 3 kW로 낮췄으며, 실드가스 유량( $G_s$ )을 0~27 l/min의 범위에서 변화시켜 실험을 진행하였다.

Fig. 4.9와 Fig. 4.10에 유량 변화에 따른 클래드 층의 외관과 단면사진, 클래드 층의 폭 및 높이, 희석률 변화 그래프를 나타낸다. 실드가스 유량이 0 l/min와 5 l/min으로 적을 때 클래드 층의 외관에서 산화층이 형성되어 표면 가장자리의 산화층이 떨어져 나가는 것을 확인할 수 있다. 10 l/min 이상에서 유량이 증가할수록 전과 같은 현상이 나타나지 않았으며, 표면과 단면 관찰 시 뚜렷한 차이가 없었다. 클래드 층의 특성 그래프를 보면, 유량이 0 l/min와 5 l/min에서는 산화 반응으로 인하여 용융금속의 점도가 낮아져 폭이 증가하였으나, 10 l/min에서 폭이 다시 감소하게 되었다. 10 l/min에서 유량이 증가하더라도 폭과 높이는 거의 유사한 값을 나타내었다. 희석률의 경우 실드가스 유량이 0 l/min와 5 l/min 보다 유량이 10 l/min 이상일 때 감소하여 전체적으로 비슷한 경향을 확인할 수 있다. 따라서 건전한 클래드 층의 형상 및 특성과 실드가스 소모량을 고려하고 고출력 레이저 사용 시 보다 안정된 실드를 위해 최적의 실드가스 유량을 20 l/min으로 설정하였다.





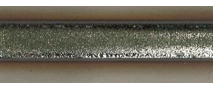



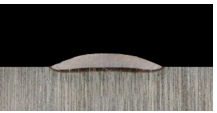







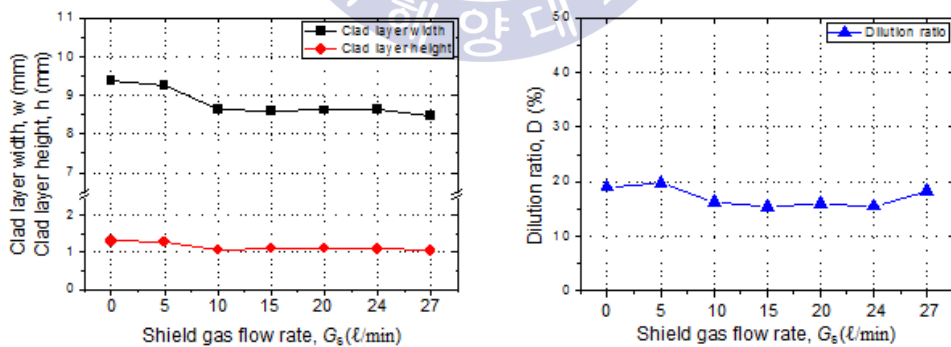
SNCrW - Stellite 6, One-pass clad ; $P : 3 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim 20 \text{ g/min})$ , $G_c : 8 \text{ l/min(Ar)}$				
$G_s (\text{l/min})$	0 l/min	5 l/min	10 l/min	15 l/min
Clad layer				
Surface				
Cross section				
$G_s (\text{l/min})$	20 l/min	24 l/min	27 l/min	X
Clad layer				
Surface				
Cross section				

Fig. 4.9 Surface and cross section of clad with shield gas flow rate



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )

(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.10 Variation of clad characteristics of Fig. 4.9



#### 4.1.4 이송가스(Ar) 유량

레이저 클래딩에서 분말을 공급하기 위해서는 분말 공급 장치에서부터 노즐을 통하여 분말이 이송되어야 한다. 노즐의 종류는 클래드 재료가 레이저 빔 조사축과 동일한 방향으로 공급되는 동축 노즐(coaxial nozzle)과 레이저 광학계 옆에 클래드 재료를 공급하는 외축 노즐(lateral nozzle)이 있으며 본 실험에서는 동축 노즐을 사용하였다. 동축 노즐은 광학계와 통합되어 있으며 모든 방향에서 가공이 가능하고 높은 분말 효율을 가진다는 특징이 있다. 동축 노즐을 사용하여 레이저 클래딩 시 분말은 이송가스(carrier gas)를 통하여 레이저 빔 조사축과 동일한 방향에서 공급된다. 이송가스로는 아르곤이나 헬륨과 같은 불활성 가스(inert gas)를 일반적으로 사용하며, 이는 분말을 운반하는 역할 뿐만 아니라 산화를 방지하기 위하여 용융풀을 보호하는 역할도 한다. 본 실험에서는 실드가스와 동일하게 아르곤을 이송가스로 사용하였다. 실드가스 유량 변화 실험과 동일한 조건으로 이송가스 유량( $G_C$ )을 4~20 l/min의 범위에서 변화시켜 실험을 실시하였다<sup>4,13)</sup>.

Fig. 4.11과 Fig. 4.12에 이송가스 유량 변화에 따른 클래드 층 외관과 단면사진, 클래드 층의 폭 및 높이, 희석률의 변화그래프를 나타낸다. 4~8 l/min의 범위에서는 클래드 층의 외관과 횡단면에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않았다. 하지만 이송가스 유량의 증가는 용융풀로 향하는 분말 공급 속도가 증가하는 것으로, 12 l/min 이상에서는 유량이 증가할수록 클래드 층 외관에 붙어있는 분말의 양이 증가하였으며, 횡단면 또한 단면의 상부가 곡선에서 점차 직선으로 변화하는 것을 확인할 수 있었다. 클래드 층의 폭과 높이의 경우 Fig. 4.12의 그래프에 나타난 바와 같이 전체적으로 비슷한 값을 얻을 수 있었으나 4 l/min에서 폭이 약간 감소하고 높이가 약간 증가한 것을 확인할 수 있었다. 이송가스 유량이 4 l/min 일 때 가스 유량이 적어 용융풀로 향하는 분말 압력이 줄어들게 되고 따라서 시편으로부터 일부 튕겨져 나오는 분말량이 감소하게 됨으로써 용융 분말량이 약간 증가하여 클래드 층의 폭이 감소하고 높이가 증가한 것으로 사료된다. 희석률 또한 동일한 이유로 4 l/min에서 최솟값을 나타내었다. 그리고 가스 유량이 증가할수록 모재 용융풀로 향하는 분말 속도가 증가하게 되어 용융금속의 대류현상이 더욱 활발하게 일어나 희석률이 점차 증가하는 것도 확인할 수 있었다.

Fig. 4.13은 이송가스 유량에 따른 횡단면의 광학현미경 사진과 실험 진행 후

모재로부터 튕겨져 나온 분말량을 그래프로 나타낸 것이다. 이송가스 유량이 4~8 l/min일 때 횡단면에서 기공이 존재하지 않았으나 12 l/min에서부터 유량이 증가할수록 클래드 층 상부 표면 조도가 거칠어지면서 기공의 발생이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 녹지 않고 용융풀 및 모재로부터 튕겨져 나온 분말량 또한 유량이 증가할수록 상승하는 경향을 나타내었다. 이에 따라서 클래드 층의 형상과 표면 조도, 발생하는 기공을 고려하고 고출력 레이저 사용 시 안정된 분말 공급을 위해 최적의 이송가스 유량을 8 l/min으로 설정하였다.



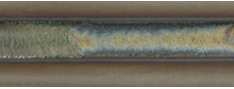

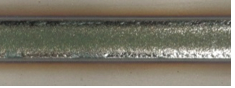





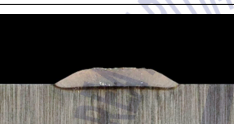
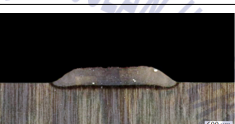
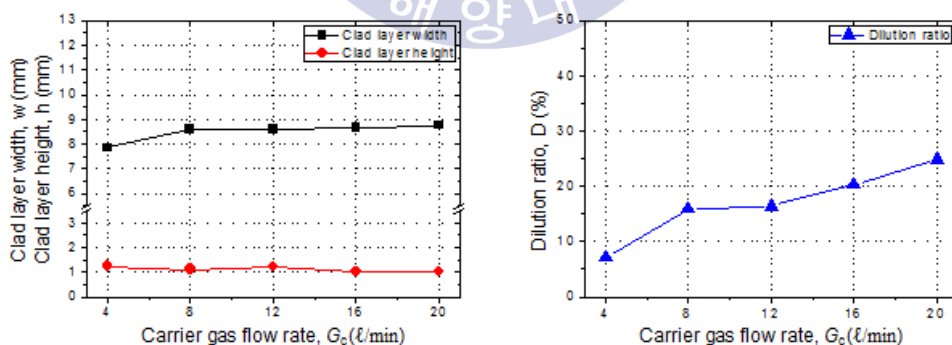
SNCrW – Stellite 6, One-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim 20 \text{ g/min})$ , $G_s : 20 \text{ l/min}(\text{Ar})$			
$G_c (\text{l/min})$ Clad layer	4 l/min	8 l/min	12 l/min
Surface			
Cross section			
$G_c (\text{l/min})$ Clad layer	16 l/min	20 l/min	X
Surface			
Cross section			

Fig. 4.11 Surface and cross section of clad with carrier gas flow rate



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )

(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.12 Variation of clad characteristics of Fig. 4.11

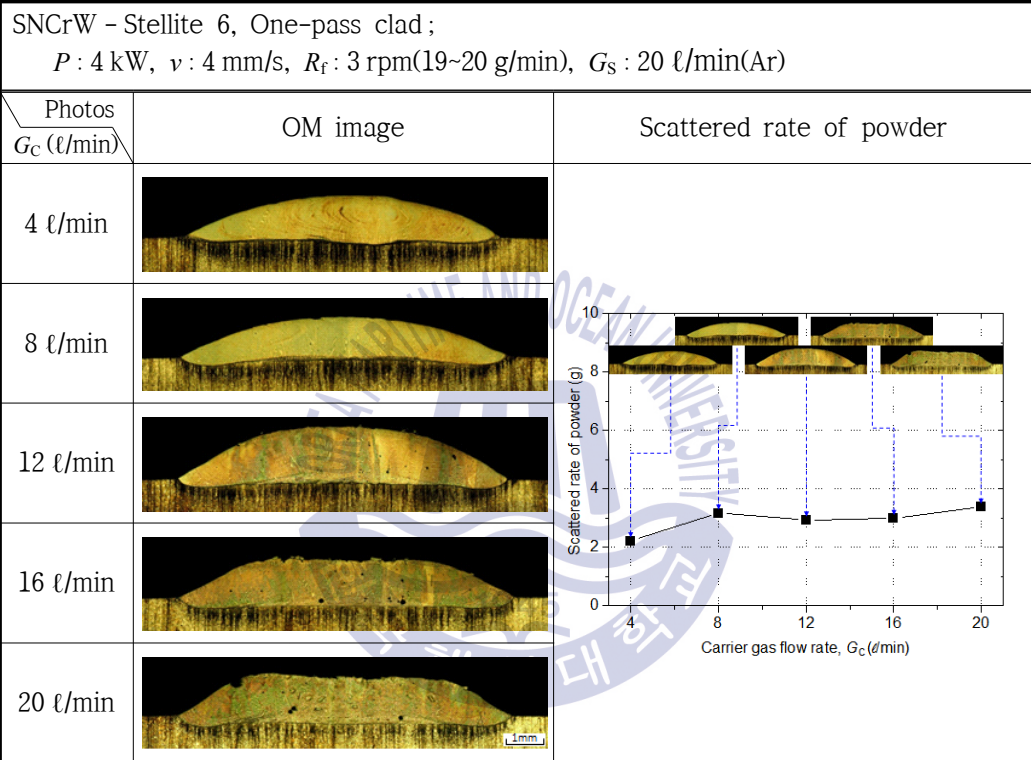


Fig. 4.13 Variation of clad with carrier gas flow rate in laser cladding

#### 4.1.5 모재 표면 상태

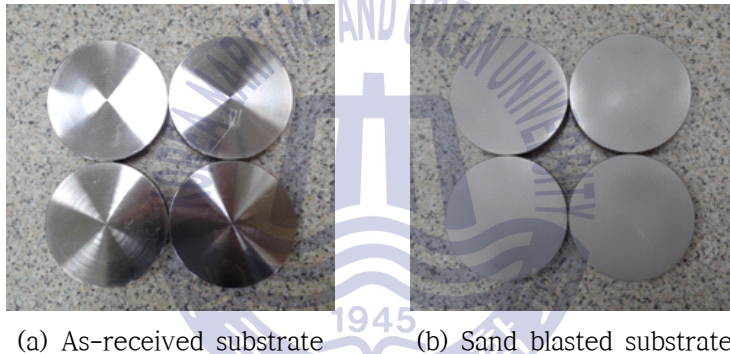
실험 전 모재 표면을 메탄올로 세척 후 쇼트(shot)기를 이용하여 샌드블라스트(Sand blast) 처리를 하였다. 샌드블라스트는 모래를 금속표면에 고속으로 분사하여 산화층·녹·오염물과 같은 스케일을 제거하고 표면 조도를 일정하게 하는 작업 과정이다. 압축 공기를 이용하여 모래를 노즐에서 분사 또는 원심력에 의해 투사하는 방법이 사용된다. Fig. 4.14는 샌드블라스트 처리 전·후 시험편 표면을 나타낸 것으로 표면 거칠기와 반사율의 차이를 확인할 수 있다. 표면 거칠기가 레이저 파장보다 작다면 매끄러운 표면에 빔이 산란하지 않고 반사하여 거울같이 보이지만, 레이저 파장보다 표면 조도가 크게 되면 빔이 산란하게 된다.

표면 조도는 특정 파장에서 재료가 흡수하는 빛의 양에 상당한 영향을 미친다. 그러므로 Fig. 4.15에 나타내듯이 표면 조도가 증가할수록 레이저는 다중 반사(multiple reflection)하여 재료 표면에 유도 흡수(stimulated absorption)되므로 빔 반사율이 감소하게 된다<sup>4.13,42)</sup>. 따라서 표면조도에 따른 영향을 알아보기 위하여 시험편 표면에 어떠한 처리도 하지 않았을 때와 100번, 400번, 800번 및 1200번 사포로 연마했을 때 그리고 기존에 계속 사용한 샌드블라스트 처리하였을 때로 나누어 실험을 진행하였다. 100번, 400번, 800번 및 1200번 사포는 번호가 커질수록 평균 연마재 입자 크기가  $162\mu\text{m}$ ,  $35\mu\text{m}$ ,  $21.8\mu\text{m}$ ,  $15.3\mu\text{m}$ 으로 작아져 고운 사포면을 가진다. 동일한 빔 이송속도, 분말 공급량, 실드 및 이송가스 조건에서 출력을 3 kW와 4 kW로 변화시켰을 때 모재 표면 상태에 따른 클래드 층의 외관과 단면사진, 클래드 층의 폭과 높이, 희석률 변화 그래프를 Fig. 4.16~Fig. 4.19에 나타낸다.

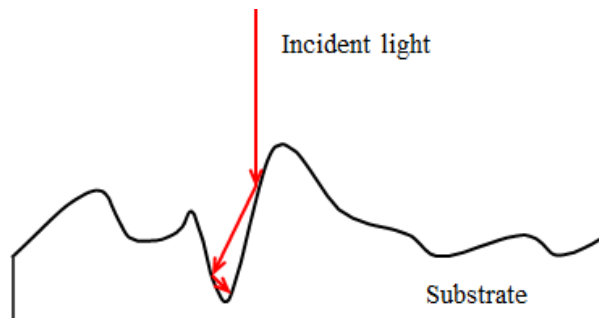
먼저 출력이 3 kW로 작을 때 모재 표면 상태에 따른 클래드 층 외관과 횡단면에서 뚜렷한 차이가 나타나지 않는다. 클래드 층의 폭과 높이를 측정한 결과 전체적으로 폭이 약 8 mm, 높이가 약 1.2 mm로 비슷한 값을 갖는 것을 알 수 있었으나 희석률에서 차이가 나타났다. 모재 표면에 아무처리도 하지 않았을 때와 1200번 사포로 연마했을 때, 표면 거칠기가 낮아 빔의 반사율이 증가하게 되어 희석률이 상대적으로 감소하였으며 이외의 나머지 조건에서는 전체적으로 비슷한 값을 나타냈다.

출력을 4 kW로 증가시켜 실험을 진행했을 때 또한, 3 kW일 때와 비슷한 결과를

확인할 수 있었다. 클래드 층의 표면과 횡단면에서 큰 차이가 나타나지 않았으며 클래드 층의 폭과 높이 측정 결과도 전체적으로 비슷한 값을 나타내었지만 회석률에서 차이가 발생하였다. 샌드블라스트 처리한 시편의 경우 표면 거칠기가 증가하게 되며 따라서 빔 흡수율이 보다 증가하여 회석률이 가장 높게 측정된 것으로 사료된다. 3 kW와 4 kW의 출력 조건에서 실험을 진행한 결과, 두 조건 모두 입열량이 높아 모재 표면 상태에 따른 영향을 뚜렷하게 확인할 수 없었으나 실험 전 시험편 표면의 스케일 제거 및 일정한 표면 조도를 위해 샌드블라스트 처리가 필요하다고 생각되므로 모든 실험에서 모재 표면에 샌드블라스트 처리를 하였다.



**Fig. 4.14** Surface reflectivity and roughness of substrate before and after sand blasting



**Fig. 4.15** Multiple reflections of laser light incident on an optically rough surface



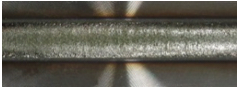
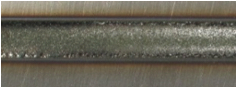
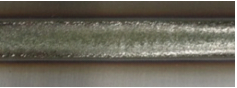

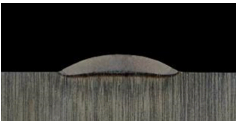







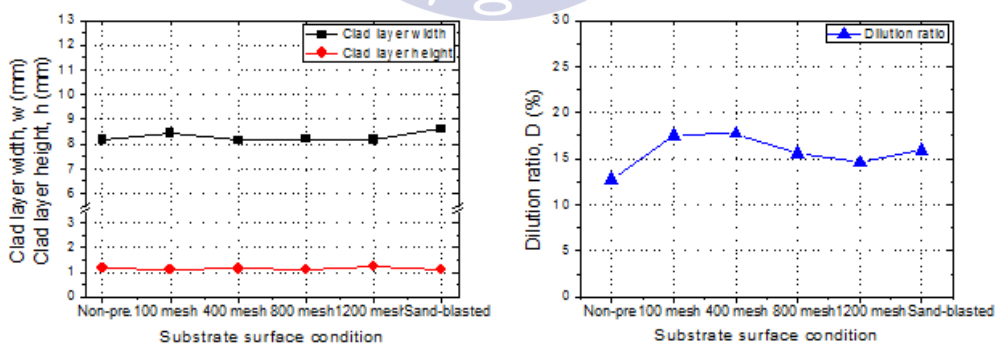
SNCrW - Stellite 6, One-pass clad ; $P : 3 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_s$ & $G_c : 20$ & $8 \text{ l/min(Ar)}$			
Substrate surface condition	Non preparation	Sand paper #100 grinding	Sand paper #400 grinding
Clad layer			
Surface			
Cross section			
Substrate surface condition	Sand paper #800 grinding	Sand paper #1200 grinding	Sand blasting
Clad layer			
Surface			
Cross section			

Fig. 4.16 Surface and cross section of clad with substrate surface condition( $P = 3 \text{ kW}$ )



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )

(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.17 Variation of clad characteristics of Fig. 4.16



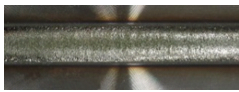
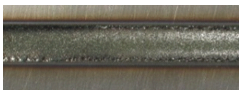
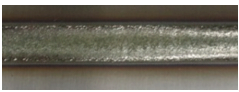



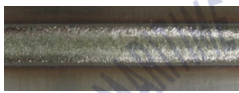


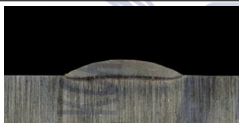


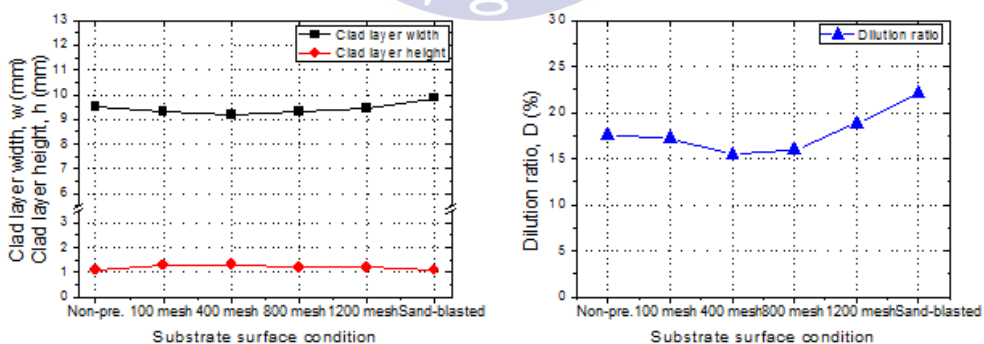
SNCrW – Stellite 6, One-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_s$ & $G_c : 20$ & $8 \text{ l/min(Ar)}$			
Substrate surface condition	Non preparation	Sand paper #100 grinding	Sand paper #400 grinding
Clad layer			
Surface			
Cross section			
Substrate surface condition	Sand paper #800 grinding	Sand paper #1200 grinding	Sand blasting
Clad layer			
Surface			
Cross section			

Fig. 4.18 Surface and cross section of clad with substrate surface condition( $P = 4 \text{ kW}$ )



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )

(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.19 Variation of clad characteristics of Fig. 4.18

## 4.2 멀티 패스 클래드 층의 특성에 미치는 공정변수의 영향

### 4.2.1 중첩률 기준의 정의에 대한 고찰

#### (1) 중첩률 기준에 따른 형상 차이

1 패스 클래딩 실험을 통하여 공정변수에 따른 클래드 층의 형상과 특성에 대하여 파악하였다. 실제 산업현장에서는 넓은 면적의 부품을 수리해야하므로 레이저 빔의 특성상 클래드 층의 중첩(overlapping)이 필수적이다. 현재까지 많은 논문을 분석한 결과 중첩률 기준이 저자에 따라서 빔 사이즈를 중심으로 한 중첩률과 클래드 층의 폭 길이를 중심으로 한 중첩률로 각각 달랐기 때문에 중첩실험을 진행하기 전 중첩률 기준의 정의에 대한 고찰이 필요하였다. 따라서 중첩률의 기준에 따른 차이를 파악하고자 본 연구에서 실험을 진행하였다.

높이 약 1 mm, 폭 약 10 mm의 1 패스 클래드 층을 형성하는 레이저 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s, 분말 공급량 19~20 g/min 조건에서 중첩률의 기준을 빔 사이즈일 때와 클래드 층의 폭 길이일 때로 나누어 실험을 진행하였다. 각각의 기준에 따른 중첩률은 Fig. 4.20에 나타난 바와 같이 계산할 수 있다. 먼저 중첩률을 6×6 mm의 빔 사이즈 기준으로 설정하였으며 중첩률을 0~30 %까지 10 % 단위로 변화시키면서 총 6개의 클래드 층이 중첩되도록 실험을 실시하였다. Fig. 4.21은 실험 진행 모식도를 나타낸 것으로 중첩률 0 %는 레이저 빔이 겹치지 않고 연속적으로 이어지며, 10 %는 빔이 0.6 mm, 20 %에서는 1.2 mm, 30 %는 1.8 mm 겹치는 것을 그림을 통해 확인할 수 있다. Fig. 4.22와 Fig. 4.23은 중첩률에 따른 클래드 층의 외관과 단면사진, 클래드 층의 폭과 높이 변화 그래프를 나타낸다. 전체적으로 균일한 높이의 클래드 층을 얻을 수 있었으며 중첩률이 증가할수록 클래드 층의 길이가 짧아지고 높이가 증가하는 것을 알 수 있었다. 높이를 정량적으로 측정하여 그래프로 나타낸 결과, 모든 중첩률 조건에서 높이 1.5 mm, 길이 30 mm 이상의 클래드 층이 형성되었으며 동일한 조건에서의 1 패스 클래드 층의 높이보다 더 높았다. 그리고 중첩률이 0 %에서 30 %로 증가할 때 클래드 층의 길이가 약 10 mm 정도 감소하였기에 생산성을 고려하여 적절한 중첩률의 선정이 필요하다는 것을 알 수 있다.

다음은 중첩률을 1 패스 클래드 층의 폭 길이를 기준으로 설정하였으며 중첩률을

0~40 %까지 10 % 단위로 변화시키면서 전 실험과 동일하게 총 6개의 클래드 층이 중첩되도록 실험을 진행하였다. 이전과 동일한 조건에서 1 패스 클래드 층의 폭은 9.86 mm로, 중첩률 0 %는 클래드 층이 전혀 겹치지 않고 연속적으로 이어지며, 10 %는 클래드 층이 0.99 mm, 20 %는 1.97 mm, 30 %에서 2.96 mm, 40 %는 3.94 mm 겹치는 것을 Fig. 4.24에 나타낸 실험 진행 모식도를 통해 확인할 수 있다. 이 모식도를 통해 중첩률 30 %까지는 레이저 빔이 겹치지 않으나 40 %부터 빔이 0.1mm 겹치게 되는 것을 알 수 있다. 중첩률에 따른 클래드 층의 외관 및 단면사진과, 클래드 층의 폭과 높이 변화 그래프를 Fig. 4.25와 Fig. 4.26에 나타내었다. 중첩률 0 %와 10 %에서는 클래드 층간의 겹침이 거의 이루어지지 않아 클래드 층의 길이가 상당히 길었으며 표면 높이가 불균일하였다. 중첩률 30 % 조건부터 높이가 비교적 균일해지고 클래드 층의 길이가 감소한 것을 확인할 수 있다. 빔 사이즈 중심으로 한 중첩률보다 높이가 감소하여 모든 중첩률 조건에서 높이 1.0 mm 이상의 클래드 층을 얻을 수 있었으며, 40 %의 조건에서는 1.5 mm 이상을 나타내었다. 또한 클래드 층의 길이는 빔 사이즈 기준일 때보다 더욱 증가하였다.



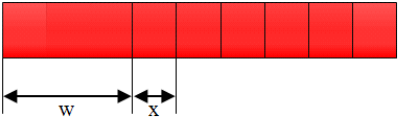
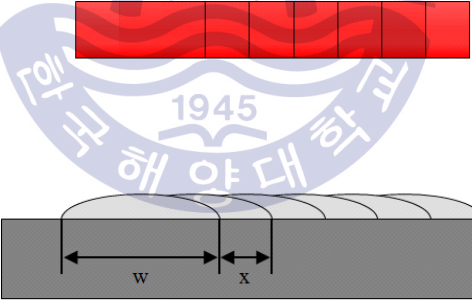
Overlapping criterion	Definition of overlapping ratio
Laser beam size	 $\text{Overlapping ratio} : \frac{(w - x)}{w}$
Clad layer width	 $\text{Overlapping ratio} : \frac{(w - x)}{w}$

Fig. 4.20 The definition of overlapping ratio with different criterion

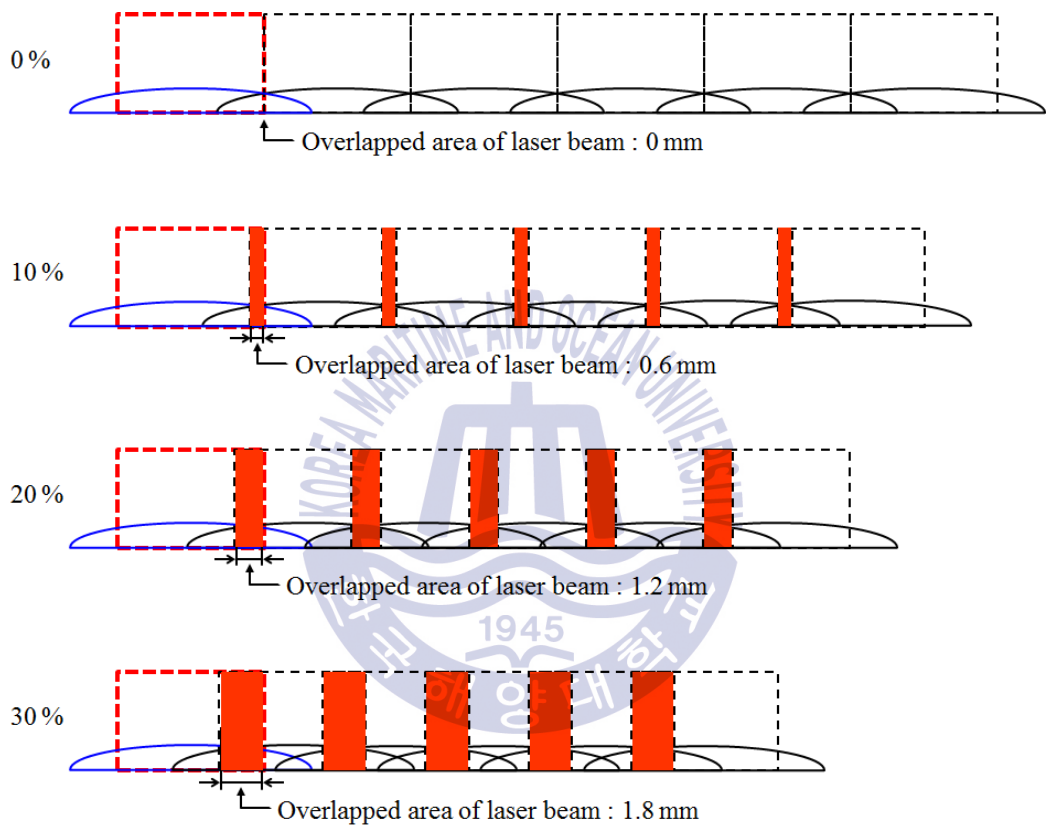


Fig. 4.21 Schematic diagram of different overlapping ratio by beam size criterion

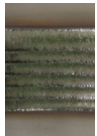

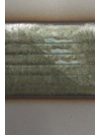

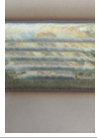



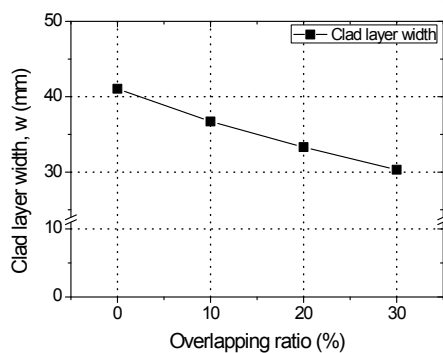
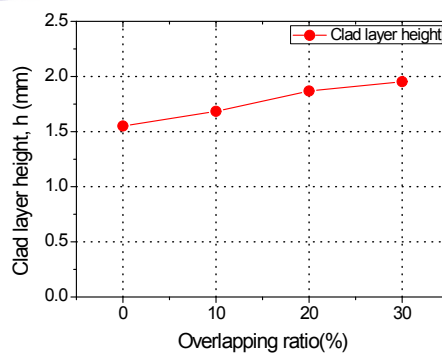
SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim 20 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$		
Photos $O_{Lap,r} (\%)$	Surface	Cross section
0 % (0 mm)		
10 % (0.6 mm)		
20 % (1.2 mm)		
30 % (1.8 mm)		

Fig. 4.22 Surface and cross section of multi-pass clad with overlapping ratio by beam size criterion



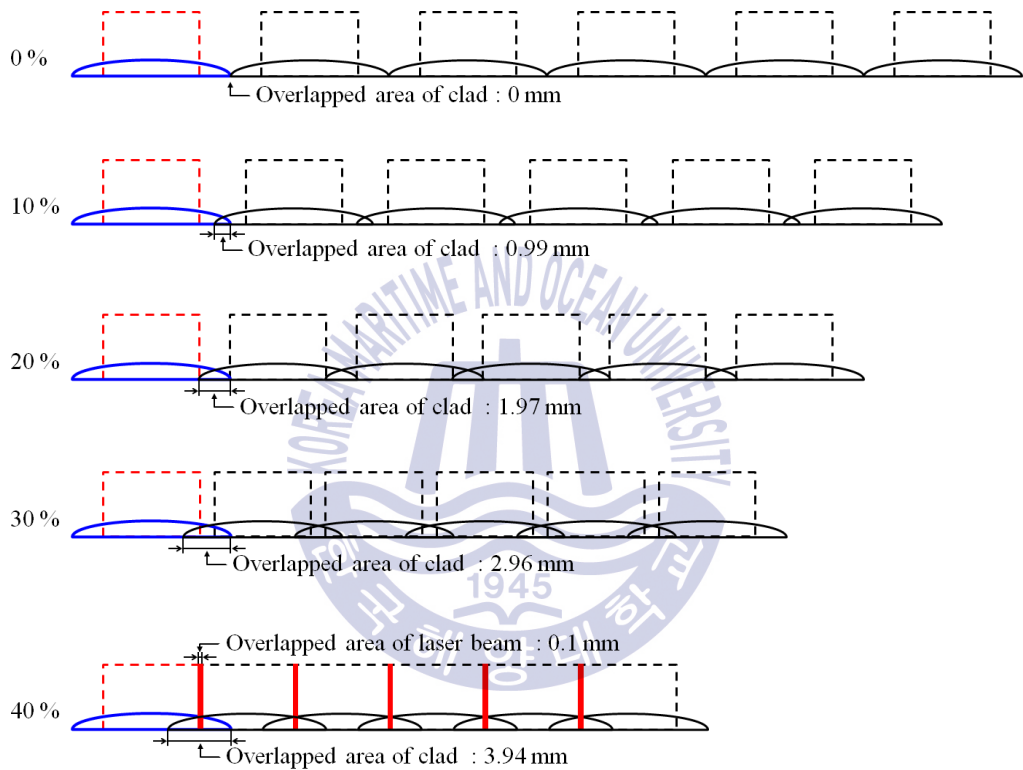
(a) Clad layer width( $w$ )







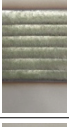





(b) Clad layer height( $h$ )

Fig. 4.23 Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.22

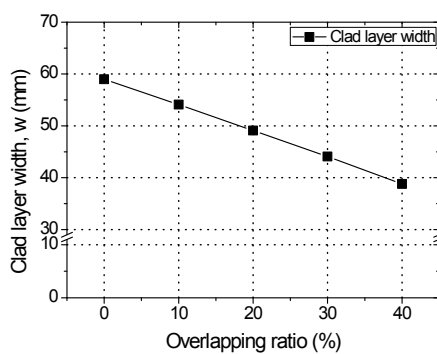




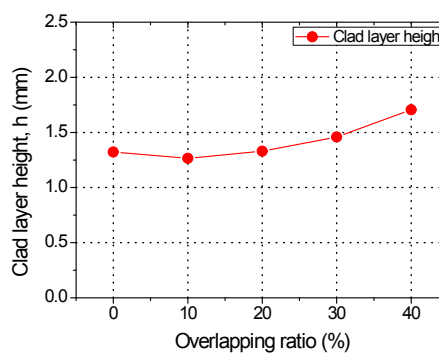
**Fig. 4.24** Schematic diagram of different overlapping ratio by clad layer width criterion

SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim 20 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$		
Photos $O_{Lap,r} (\%)$	Surface	Cross section
0 % (0 mm)		
10 % (0.99 mm)		
20 % (1.97 mm)		
30 % (2.96 mm)		
40 % (3.94 mm)		

**Fig. 4.25** Surface and cross section of multi-pass clad with overlapping ratio by clad layer width criterion



(a) Clad layer width( $w$ )



(b) Clad layer height( $h$ )

**Fig. 4.26** Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.25

## (2) 중첩률 기준에 따른 물성 및 성분 차이

중첩률 기준에 따른 클래드 층의 형상 차이를 확인한 후, 물성 차이를 비교하기 위해 클래드 층의 경도 분포를 조사하였다. 표면 조도가 일정해지는 조건에서의 빔 사이즈와 클래드 층 폭 기준으로 중첩률에 따른 클래드 층에서 경도는 첫 번째, 두 번째, 네 번째 그리고 마지막 클래드 층의 표면에서  $15\mu\text{m}$  떨어진 지점에서부터 종방향으로  $60\mu\text{m}$  간격을 두고 측정하였다. Fig. 4.27은 빔 사이즈 기준 20 % 조건에서 경도 측정 결과로, 첫 번째 클래드 층 영역인 그래프 a는 경도값 400~460 Hv, 평균 440 Hv로 측정되었다. 하지만 b, c, d 그래프를 확인해보면 클래드 층의 경도가 450~510 Hv, 450~530 Hv, 470~530 Hv으로 평균 473 Hv, 482 Hv, 494 Hv의 값을 나타내며 첫 번째 클래드 층의 경도 값보다 높은 것을 알 수 있다. 첫 번째 클래드 층에서는 모재의 용융이 상대적으로 많이 발생하여 철의 희석이 많아졌기 때문에 다른 클래드 층에 비해 경도 값이 낮게 측정되었으며 두 번째 클래드 층에서부터는 철의 희석이 줄어들어 경도가 상승한 것으로 사료된다.

빔이 겹치지 않는 클래드 층 폭 기준 중첩률 30 % 조건에서 경도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4.28에 나타낸다. Fig. 4.28의 경도 값은 앞선 Fig. 4.27과 달리 a, b, c, d 그래프 모두 비슷한 경도 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 중첩률이 빔 사이즈 기준으로 20 %의 조건일 때보다 전체적으로 철의 희석이 증가하여 클래드 층의 경도값은 400~500 Hv, 평균 450 Hv 정도로 낮은 값을 나타내었다. 경도 값의 차이가 발생하는 이유를 파악하고자 클래드 층의 성분 분석을 실시하였다.

Fig. 4.29~Fig. 4.31은 중첩률이  $6\times 6\text{ mm}$ 의 빔 사이즈 기준으로 20 %일 때 횡단면의 광학현미경 사진과 실험 진행 모식도, EDS 라인 분석 결과를 나타낸다. Fig. 4.30의 a, b, c, d 그래프는 클래드 층 표면에서부터 깊이 방향으로의 성분 분석을 나타낸 것이고, Fig. 4.31의 e, f, g, h 그래프는 Fig. 4.29의 사진에 나타내는 바와 같이 클래딩 진행 방향으로 성분 분석한 결과이다. 먼저, a~d 그래프에서 Fe 성분이 다르게 분포하는 것을 알 수 있다. 즉, a 그래프가 나타내는 첫 번째 클래드 층에서 Fe 성분이 약 20 % 가까이 나타내는 것을 확인할 수 있지만, b 그래프의 상부에서 10 % 미만으로 측정되다가 다시 증가하였으며 c, d 그래프에서

클래드 층 전체가 약 10 % 미만으로 감소하여 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 첫 번째 클래드 층을 포함하는 e 그래프와 나머지 f~h 그래프에서도 Fe 성분 분포가 다르다는 것을 알 수 있다. e 그래프는 첫 번째 클래드 층과 두 번째 클래드 층 사이 영역으로 그래프의 앞부분에서 Fe가 약 20 % 가까이 높게 나타났지만 f~h 그래프에서는 Fe 성분이 매우 적은 양의 고른 분포를 나타내는 것을 확인할 수 있다. Fig. 4.29의 멀티 패스 클래딩 진행 모식도를 통해 중첩률 20 %는 레이저 빔이 1.2 mm 겹치는 것으로 첫 번째 클래드 층 형성 시 6 mm 길이의 레이저 빔이 모재에 조사되나 두 번째 빔부터는 기존에 형성된 클래드 층에서도 빔이 조사되면서 모재에 직접적으로 조사되는 빔의 길이가 6 mm보다 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 모재로 직접 조사되는 레이저 빔의 길이가 줄어들게 되므로 Fe의 희석이 감소하게 된 것으로 사료된다.

Fig. 4.32~Fig. 4.34는 중첩률이 클래드 층의 폭 길이를 기준으로 30 %일 때 횡단면의 광학현미경 사진과 실험 진행 모식도, EDS 라인 분석 결과이다. 전과 동일하게 Fig. 4.33의 그래프 a~d는 클래드 층 표면에서부터 깊이 방향으로, Fig. 4.34의 e~g 그래프는 클래드 층 중앙부를 화살표 방향으로 성분 분석한 결과를 나타낸다. a~d 그래프를 통해 어느 클래드 층에서도 Fe 성분이 약 20 % 가까이 높게 측정되었으며, e~g 그래프에서도 전체적으로 Fe 성분이 높게 나타났지만 그래프 일부분에서 10 % 가까이 감소하는 것을 확인할 수 있으며, g 그래프에서 이러한 현상이 두드러지게 나타났다. g 영역을 경도 측정한 결과 Fe이 감소한 영역에서 경도는 상승하였다. Fig. 4.32의 멀티 패스 클래딩 진행 모식도를 통해 중첩률 30 %는 클래드 층만 2.96 mm 중첩되며 레이저 빔은 겹치지 않고 약 0.9 mm 간격으로 떨어지면서 조사되는 것을 알 수 있다. 첫 번째 클래드 층을 형성할 때 6 mm 길이의 레이저 빔이 모재에 조사되며 빔이 겹치지 않으므로 두 번째 클래드 층을 형성할 때도 거의 6 mm 길이에 가까운 빔이 조사되며 다만, 클래딩이 진행될수록 모재의 온도가 점차 상승하면서 클래드 층의 폭이 증가하게 되고 따라서 실제 레이저가 재료에 닿는 면적은 약간 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 결과적으로 빔 사이즈 기준일 때 보다 전체적으로 철의 희석이 증가하였으며 그로 인해 경도값도 감소한 것을 알 수 있다. 그리고 성분 분포가 균일하지 못한 것은 Fe 성분이 거의 없는 분말 용액이 퍼지면서

클래드 층이 형성되거나 용융된 모재와의 대류현상으로 다시 철 성분이 증가하며, 클래딩이 진행될수록 열이 축적되면서 용액의 퍼짐성이 더 좋아지게 되어 Fe 성분이 감소한 영역의 길이가 증가하는 것으로 사료된다.

결론적으로, 멀티 패스 클래딩 시 중첩률의 기준을 클래드 층의 폭 길이로 할 경우, 클래드 층은 분말의 용액이 흐름에 의해 형성되므로 클래드 층의 성분과 물성이 균일하지 않게 되고 무엇보다도 출력과 빔 이송속도, 분말 공급량과 같이 클래드 층 형상에 영향을 주는 변수를 변화시킬 때마다 폭의 길이가 증감하게 되므로 추후 기술되는 중첩 실험에서는 빔 사이즈를 기준으로 중첩률을 정의하여 연구를 진행하였다.



SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ;

$P : 4 \text{ kW}$ ,  $v : 4 \text{ mm/s}$ ,  $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim 20 \text{ g/min})$ ,  $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$

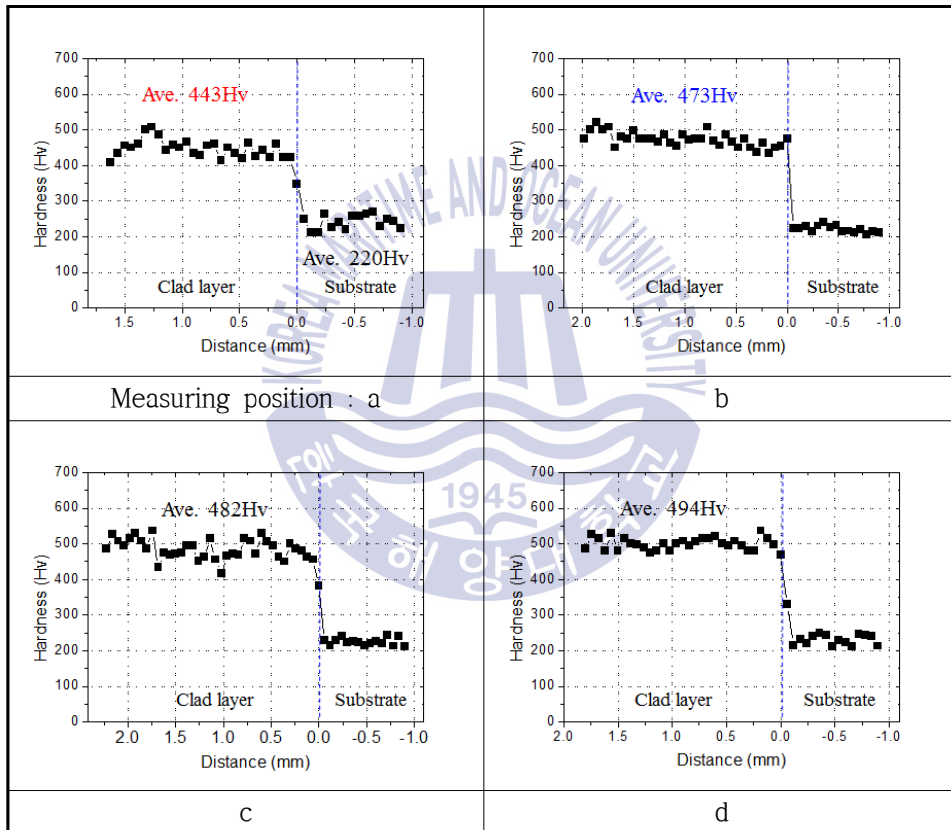
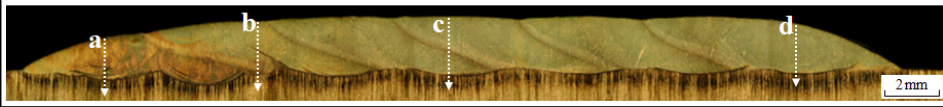


Fig. 4.27 Variation of hardness at 20 % overlapping ratio by beam size criterion



SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ;

$P : 4 \text{ kW}$ ,  $v : 4 \text{ mm/s}$ ,  $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min),  $G_s$  &  $G_c : 20$  &  $8 \text{ l/min(Ar)}$

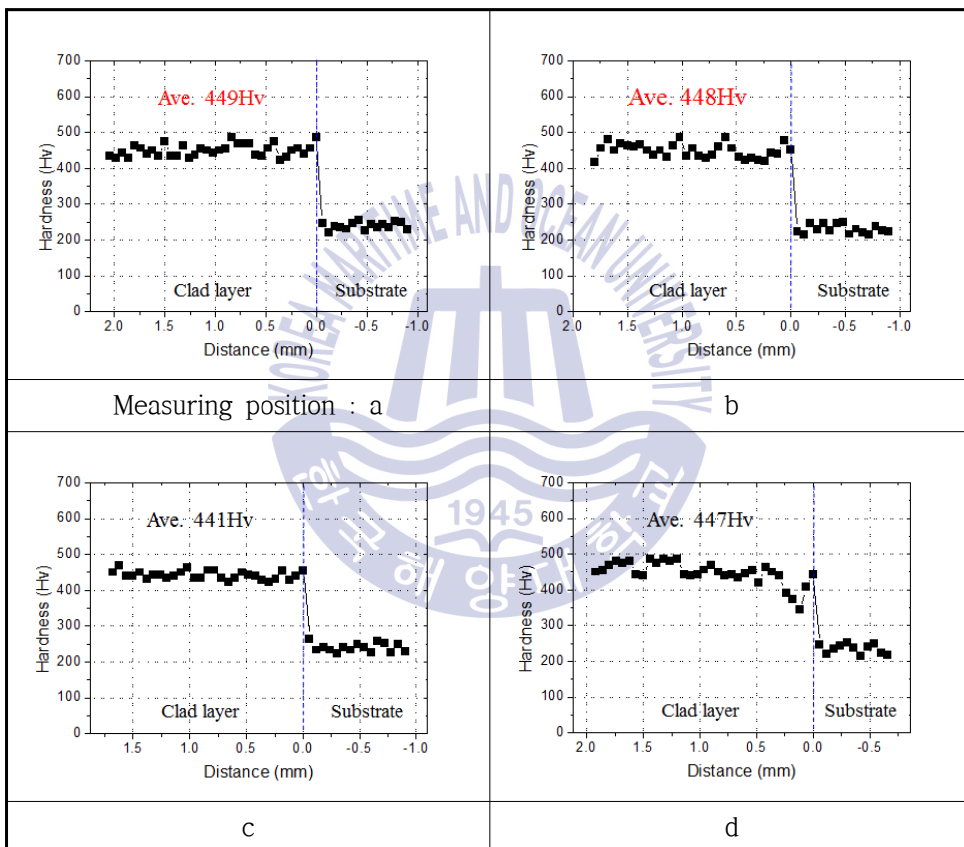
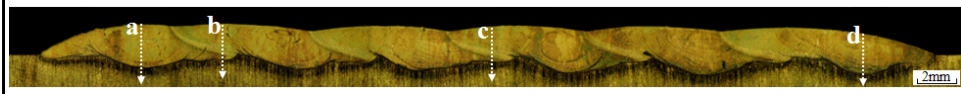


Fig. 4.28 Variation of hardness at 30 % overlapping ratio by clad layer width criterion

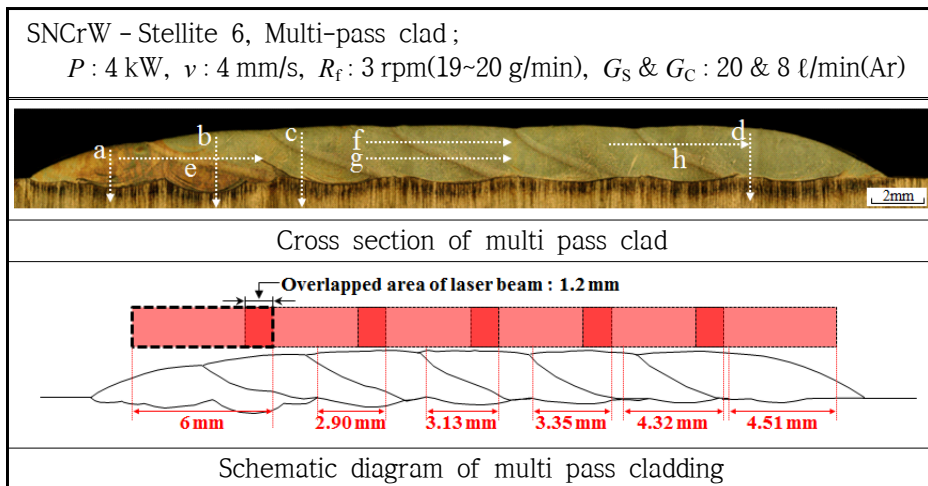


Fig. 4.29 Cross section and schematic diagram of multi-pass cladding at 20 % overlapping ratio by beam size criterion

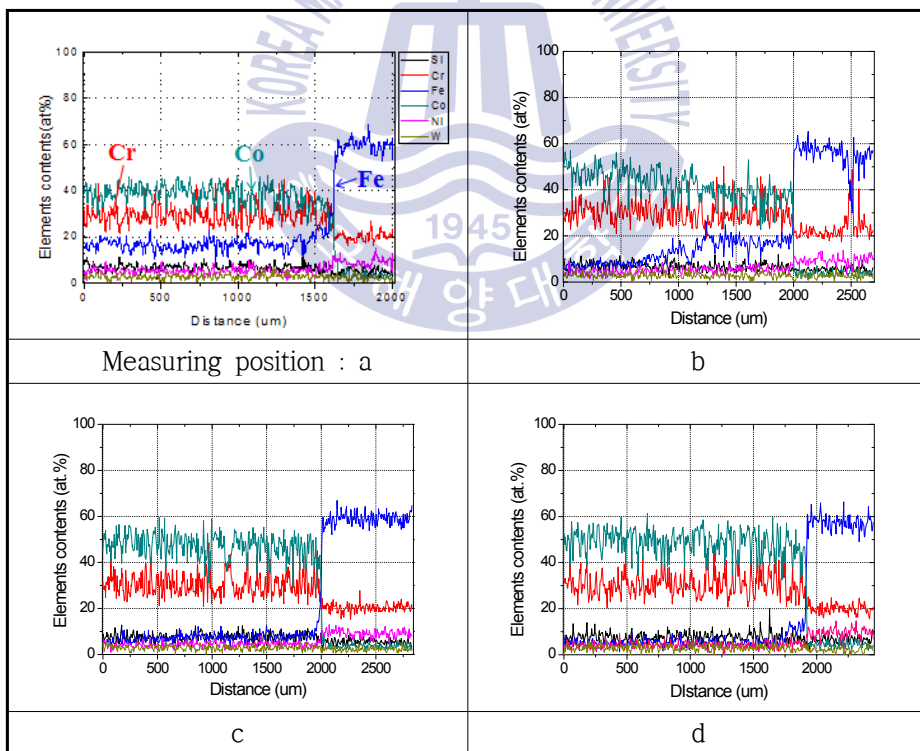
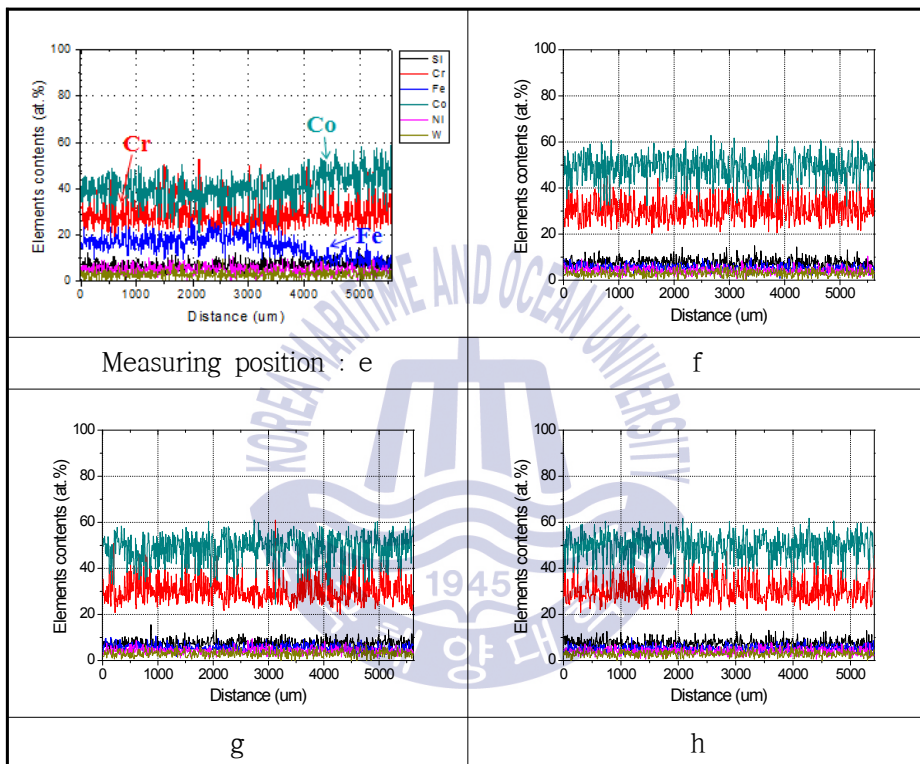


Fig. 4.30 Results of EDS analysis on a, b, c and d position in Fig. 4.29



**Fig. 4.31** Results of EDS analysis on e, f, g and h position in Fig. 4.29

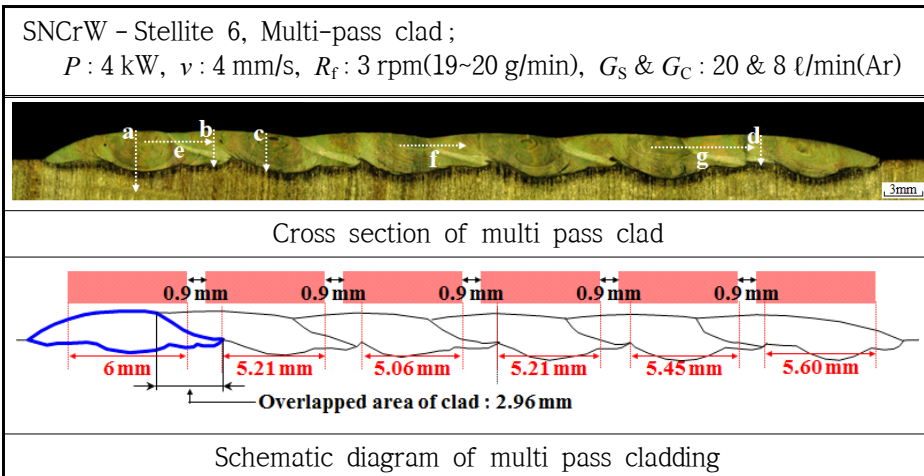


Fig. 4.32 Cross section and schematic diagram of multi-pass cladding at 30 % overlapping ratio by clad layer width criterion

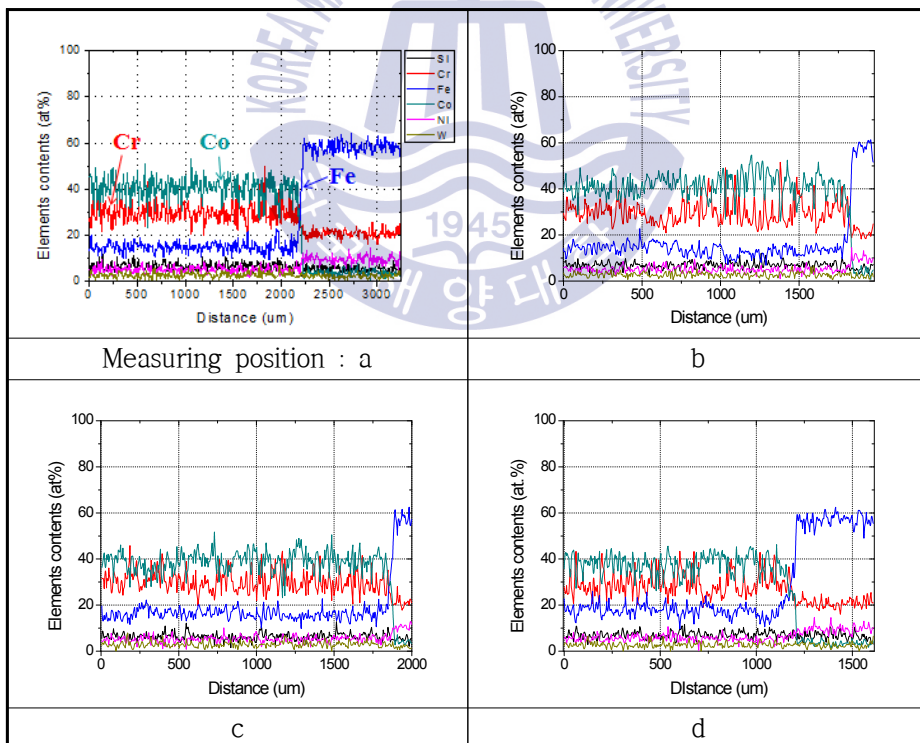
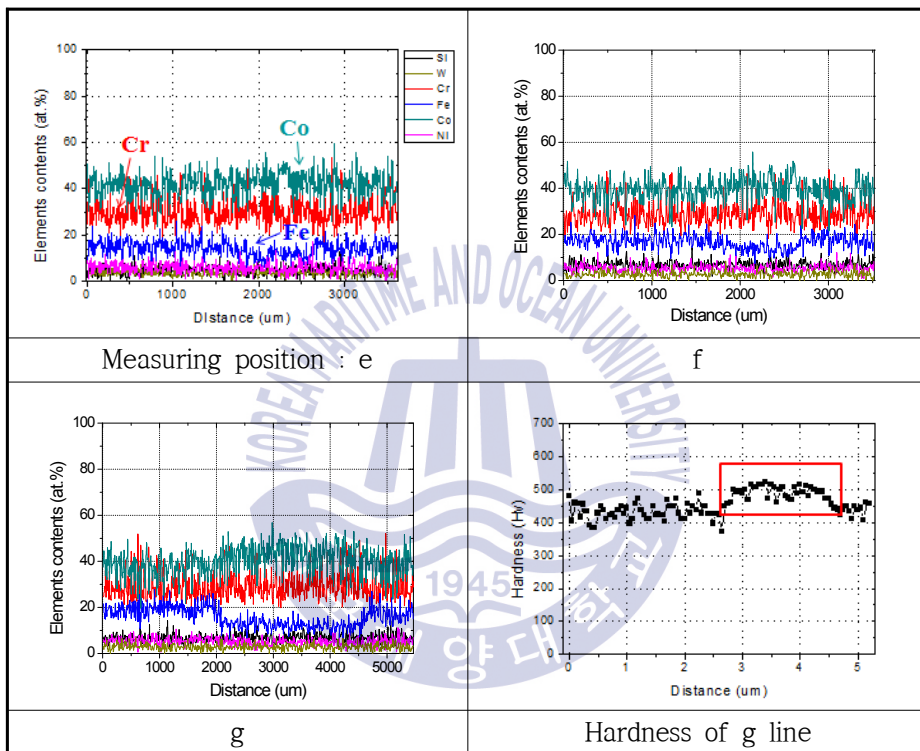


Fig. 4.33 Results of EDS analysis on a, b, c and d position in Fig. 4.32



**Fig. 4.34** Results of EDS analysis on e, f and g position and hardness of g position in Fig. 4.32

#### 4.2.2 중첩률에 따른 클래드 층의 단면 형상 관찰

중첩률 기준에 따른 차이 실험을 통해 레이저 빔이 접칠 때 균일한 물성과 성분을 가진 클래드 층을 얻을 수 있었으므로 중첩률 기준을  $6 \times 6 \text{ mm}$ 의 빔 사이즈로 설정하였다. 중첩률이 증가할 때 클래드 층에서 발생하는 차이를 알아보기 위해 분말 공급량이 19~20 g/min일 때와 32~33 g/min일 때로 나누어 실험을 진행하였다. 1 패스 클래딩 실험을 통해 레이저 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s의 조건에서 분말 공급량이 19~20 g/min일 때 높이 약 1 mm, 32~33 g/min일 때 높이 약 2 mm의 클래드 층을 얻을 수 있었다. 따라서 이와 동일한 출력 및 빔 이송속도 조건에서 분말을 19~20 g/min과 32~33 g/min으로 공급하면서 동시에 중첩률을 0~30 %까지 10 % 간격으로 변화시켜 총 6개의 클래드 층이 중첩되도록 실험을 진행하였으며 클래드 층의 외관 및 횡단면 사진, 클래드 층의 폭과 높이 변화 그래프를 각각 Fig. 4.22~Fig. 4.23과 Fig. 4.35~Fig. 4.36에 나타내었다. 두 가지 분말 공급량 조건 모두 중첩률이 증가할수록 클래드 층의 길이가 감소하였으며 높이가 증가하는 것을 알 수 있다. 분말 공급량이 19~20 g/min일 때 멀티 패스 클래드 층의 높이를 측정한 결과 모든 중첩률 조건에서 약 1.5 mm 이상을 나타내었으며 30 % 중첩률에서는 약 2 mm 높이의 클래드 층이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 공급 분말량을 32~33 g/min으로 더 많을 때 클래드 층의 높이가 2.5 mm 이상으로 측정되었으며 30 % 중첩률 조건에서는 높이가 약 3.5 mm이었다. 중첩을 통해 1 패스 클래드 층 보다 더 높은 클래드 층을 얻을 수 있었으며, 0 % 중첩률에서도 클래드 층의 높이가 약 0.5 mm 더 상승하였다. 또한 동일한 중첩률에서 공급되는 분말량이 더 많을 때 더 높은 클래드 층을 형성할 수 있었다. 그리고 분말 공급량이 19~20 g/min일 때 클래드 층의 단면에서 기공이나 균열과 같은 결함이 발생하지 않았지만, 32~33 g/min으로 증가시켰을 때 모든 중첩률 조건에서 모재 근처 중첩 경계부에서 기공이 발생하는 것을 Fig. 4.35의 단면사진을 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 4.37은 중첩부에 발생하는 기공(inter-run porosity)에 대한 모식도를 나타낸 것으로, 기존 연구를 통해 클래딩 공정변수와 재료 성분이 기공 발생과 관련 있다는 것을 확인할 수 있었다. 자료에 따르면 중첩부에 기공을 발생시키는 주요 요인은 클래드 층의 깊이 대 폭의 비를 의미하는 어스펙트 비(aspect ratio,  $w/h$ )로,



중첩부에 발생하는 기공을 감소시키기 위해서는 어스펙트 비가 5 이상이 되어야 한다고 보고되고 있다. 또한 클래딩 진행 동안, 분말 공급량 대비 빔 에너지가 충분하지 않으면 중첩 경계부에서 비금속 접합부가 발생하게 되고 코팅 층이 응고하면서 이러한 비금속 접합부가 수축하여 기공이 발생하게 된다. 그리고 파워 밀도가 높으면 용융풀의 대류 현상을 더욱 활발하게 하여 기공 발생을 감소시키지만 분말의 용융점이 높고 모재의 열전도성이 우수하면 용융풀이 더욱 빠르게 응고하여 더 쉽게 기공이 발생할 수 있다<sup>4,13,43-44</sup>.











SNCrW – Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 5 \text{ rpm}(32\sim33 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$		
Photos $O_{Lap,r} (\%)$	Surface	Cross section
0 % (0 mm)		
10 % (0.6 mm)		
20 % (1.2 mm)		
30 % (1.8 mm)		

Fig. 4.35 Surface and cross section of multi-pass clad with overlapping ratio ( $R_f = 5 \text{ rpm}(32\sim33 \text{ g/min})$ )

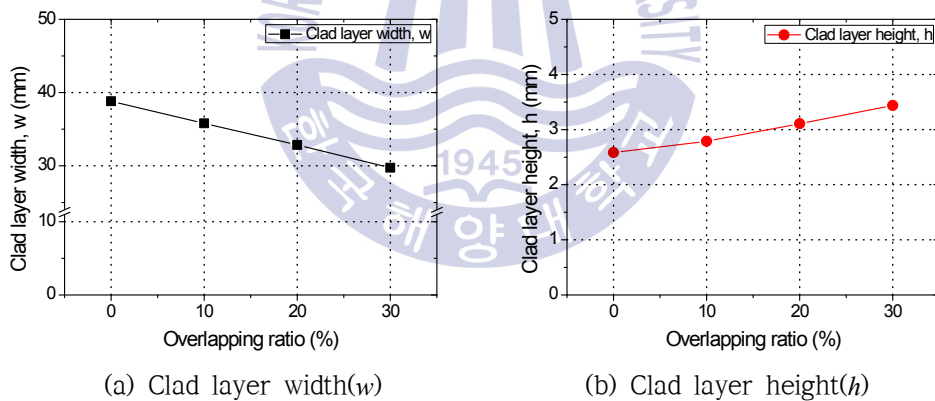


Fig. 4.36 Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.35

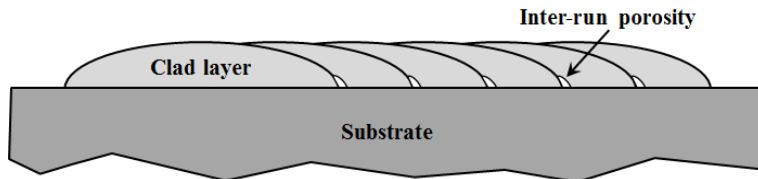


Fig. 4.37 Inter-run porosity between adjacent clad layers

### 4.2.3 2층 적층 시 시작위치 변화 및 클래드 층 표면 온도에 따른 영향

#### (1) 적층 시작위치 변화에 따른 영향

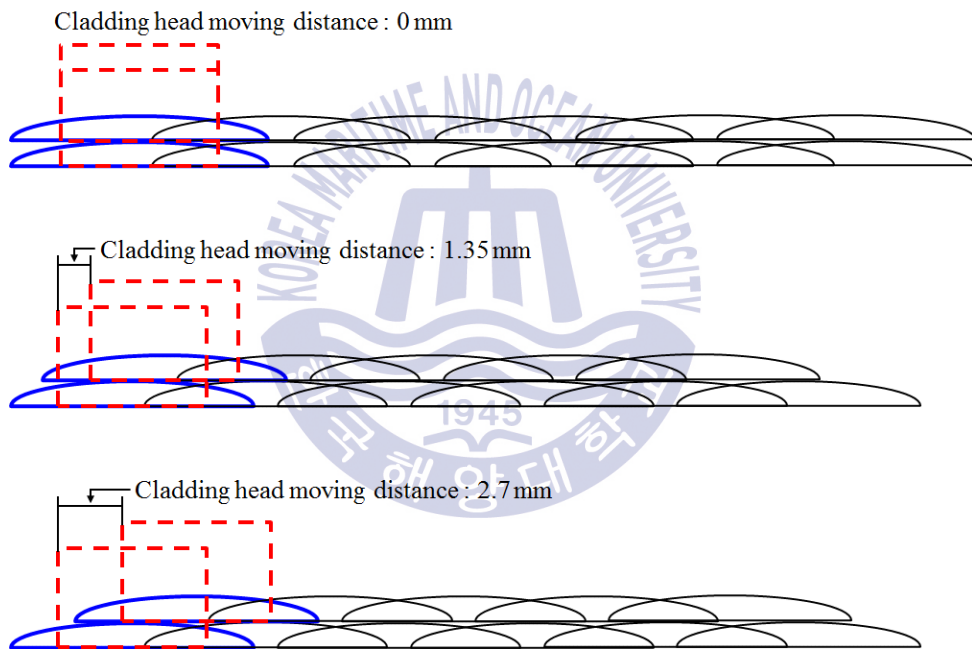
넓은 면적을 클래딩하기 위해서 클래드 층의 중첩이 필요하듯, 높은 높이의 클래드 층을 형성할 때는 분말 공급량을 증가시키거나 클래드 층을 쌓아올려야 한다. 이전 결과를 통해 빔 에너지에 비해 분말 공급량을 너무 많을 경우 중첩부에 기공이 발생할 가능성이 있으므로 클래드 층을 적층하여 높은 높이의 클래드 층을 형성할 수 있다. 그리고 중첩 실험을 통해 횡단면에서 높이가 거의 균일하나 클래드 층이 겹치는 부분에서 오목하게 홈이 들어가는 부분을 확인할 수 있었다. 중첩률이 증가할수록 이러한 부분이 거의 사라졌으나 클래드 층의 길이가 감소하게 되어 생산성에 문제가 생길 수 있다. 또한 실제 산업현장에서는 클래딩 후 표면 일부를 갈아내어 균일한 높이의 클래드 층을 형성하도록 재가공을 실시한다. 그러므로 중첩 및 적층 시 짧은 작업 시간으로 가능한 넓은 면적에 균일한 높이의 클래드 층을 형성해야하므로 따라서 2층으로 적층할 경우 적층 시작위치 변화에 따른 영향을 알아보려고 실험을 진행하였다.

적층 시작위치는 클래딩 헤드 중심 위치로부터 조절하였으며 본 실험에서는 클래딩 헤드 이동거리( $D_{Ch,mov}$ )를 0 mm, 1.35 mm, 2.7 mm로 나누어 실험을 실시하였다. Fig. 4.38의 모식도를 참고하면 이동거리 0 mm는 2층과 1층 클래딩의 시작 위치가 동일한 것을, 2.7 mm는 2층 적층을 시작할 때 클래딩 헤드의 중심 위치와 1층 클래드 층에서 오목하게 홈이 들어간 부분을 일치하게끔 이동한 거리이며, 1.35 mm의 경우 2.7 mm의 절반을 의미하는 것을 알 수 있다. 실험은 중첩률 10 %와 20 % 중 클래드 층이 겹치는 부분에 홈이 더 두드러지게 형성된 10 %의 조건에서 진행하였으며, 나머지 변수는 전과 동일하게 하였다. Fig. 4.39 ~ Fig. 4.40에 클래드 층 표면과 횡단면, 클래드 층의 폭과 높이 변화 그래프를 나타낸다. 표면과 횡단면 관찰 결과 3가지 조건 모두 폭과 높이가 비슷하였으며, 0 mm의 조건 즉 클래딩 헤드가 이동하지 않고 처음 위치와 동일할 때 가장 균일한 높이의 클래드 층 표면이 형성되는 것을 확인할 수 있다. 폭은 약 36 mm로 거의 동일한 값이었으며 높이는 전체적으로 약 3.5 mm 이상으로, 시작 위치에 따른 클래드 층의 높이 및 폭의 차이는 크지 않았다.

적층 시작위치에 따른 클래드 층의 형상 비교 후 중첩부의 물성 변화를 확인하고자 클래드 층의 표면에서부터 1 mm 떨어진 지점(a)과 높이의 중앙 지점(b)에서 횡방향으로 경도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4.41에 나타낸다. a 영역의 경도 측정 결과를 통해 클래딩 헤드가 0 mm, 1.35 mm, 2.7 mm 이동 시 각각의 평균 경도는 502 Hv, 491 Hv, 515 Hv로 비슷한 값을 나타내며, b 영역에서는 a 영역 보다는 약간 감소한 485 Hv, 482 Hv, 499 Hv로 세 조건의 평균 경도의 차이가 크지 않고 비슷한 것을 알 수 있다. 경도 분포 그래프에서 중첩부분 경도가 약간 감소하면서 다시 증가하는 경향을 세 가지 조건 모두에서 확인할 수 있다. 이미 형성된 클래드 층에 다시 빔이 조사되면서 열 영향으로 인한 결정립의 조대화가 발생했기 때문에 경도 분포의 감소가 나타난 것으로 사료된다. 표면처리의 품질 평가 방법 중 하나는 경도의 연속성으로, 적층 시작위치에 따라 중첩부에서 경도의 연속성을 비교했을 때 클래딩 헤드가 2.7 mm 이동한 조건에서 다른 조건에 비하여 다소 고른 경도 분포를 확인할 수 있으나 뚜렷한 차이는 나타나지 않았다.

형상 및 물성 차이 외에도 클래드 층의 성분 차이를 확인하고자 클래딩 헤드 0 mm, 2.7 mm 이동하는 2가지 조건에서 EDS 라인 분석을 실시하였다. 첫 번째(a), 두 번째(c), 세 번째(e) 클래드 층과 첫 번째와 두 번째 클래드 층이 겹치는 부분(b)과 두 번째와 세 번째 클래드 층이 겹치는 부분(d)을 클래드 층 표면에서부터 깊이 방향으로 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4.42에 나타내었다. a 그래프의 경우 두 가지 조건 모두에서 2층의 Fe 성분이 약 10 % 미만으로 적은 양이 측정되었으나, 1층에서 약 20 %로 증가한 것을 알 수 있다. b 그래프에서는 두 조건의 측정위치 차이로 인해 성분 분포가 약간 다르게 나타났다. 클래딩 헤드 이동하지 않았을 때 a 그래프와 비슷하게 2층에서는 철 성분이 적게 분포하였으나 1층에서 증가하는 것을 확인할 수 있다. 반면 헤드가 2.7 mm 이동했을 때 2층과 1층이 겹치는 부분에서 철이 적은 양으로 측정되었으나 1층의 첫 번째 클래드 층에 해당하는 위치에서 철 성분이 점차 증가하는 것을 알 수 있다. c~e 그래프는 첫 번째 클래드 층을 제외한 나머지 부분으로 2조건 모두에서 1층과 2층의 Fe 성분이 약 10 % 미만으로 거의 일정한 양을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 결과적으로 클래딩 헤드 이동거리가 0 mm인 경우와 2.7 mm인 경우의 두 조건을 비교해보았을 때 뚜렷한 성분 분포 차이는 나타나지 않았다. 그러므로 적층

시작위치에 따라 형상, 물성 및 성분 분포를 비교한 결과, 중첩률 10% 조건의 멀티 패스 클래드 층의 중첩 부분 홈의 깊이가 깊지 않았기 때문에 두드러지는 차이가 나타나지 않았다고 사료되며 앞으로 기술되는 적층 실험에서는 클래딩 헤드를 이동시키지 않고 실험을 진행하였다.



**Fig. 4.38** Schematic diagram of different cladding head position in multi-layer laser cladding

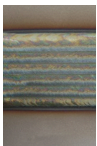

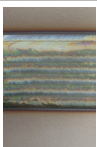

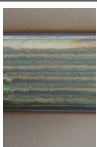
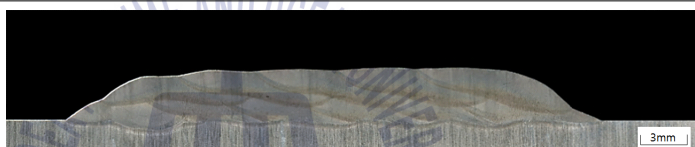
SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim20 \text{ g/min})$ , $G_S \text{ \& } G_C : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ , $O_{Lap.r} : 10 \%$		
Photos $D_{Ch.mov.}(\text{mm})$	Surface	Cross section
0 mm		
1.35 mm		
2.7 mm		

Fig. 4.39 Surface and cross section of multi-pass clad with different cladding head position in multi-layer laser cladding

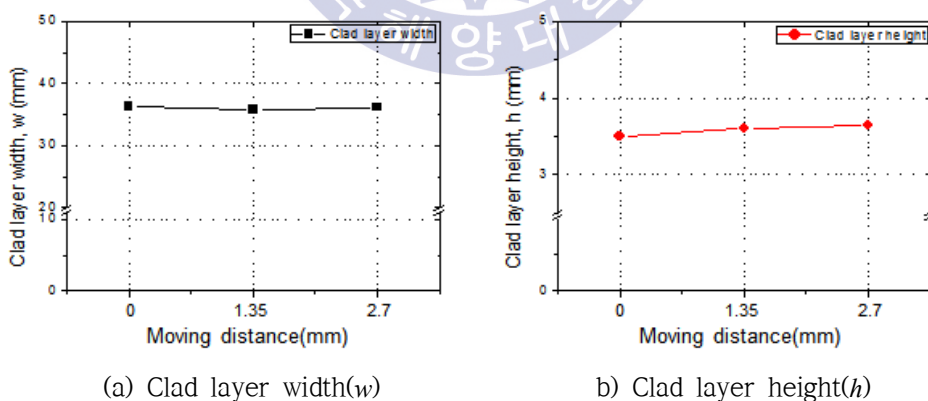


Fig. 4.40 Variation of multi-pass clad characteristics of Fig. 4.39



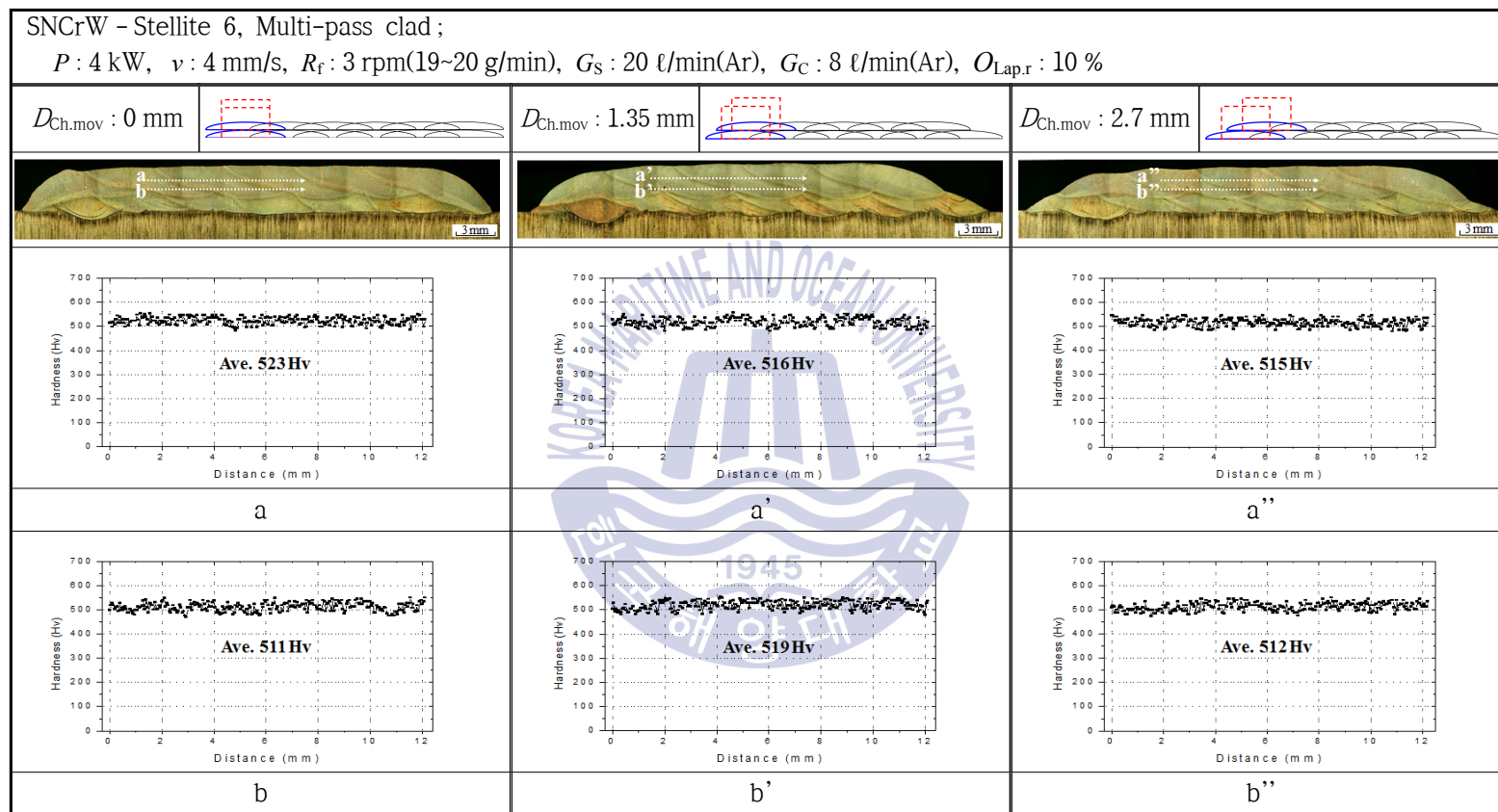


Fig. 4.41 Variation of hardness with different cladding head position in multi-layer laser cladding

SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ;

$P : 4 \text{ kW}$ ,  $v : 4 \text{ mm/s}$ ,  $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min),  $G_S : 20 \text{ l/min(Ar)}$ ,  $G_C : 8 \text{ l/min(Ar)}$ ,  $O_{Lap,r} : 10 \%$

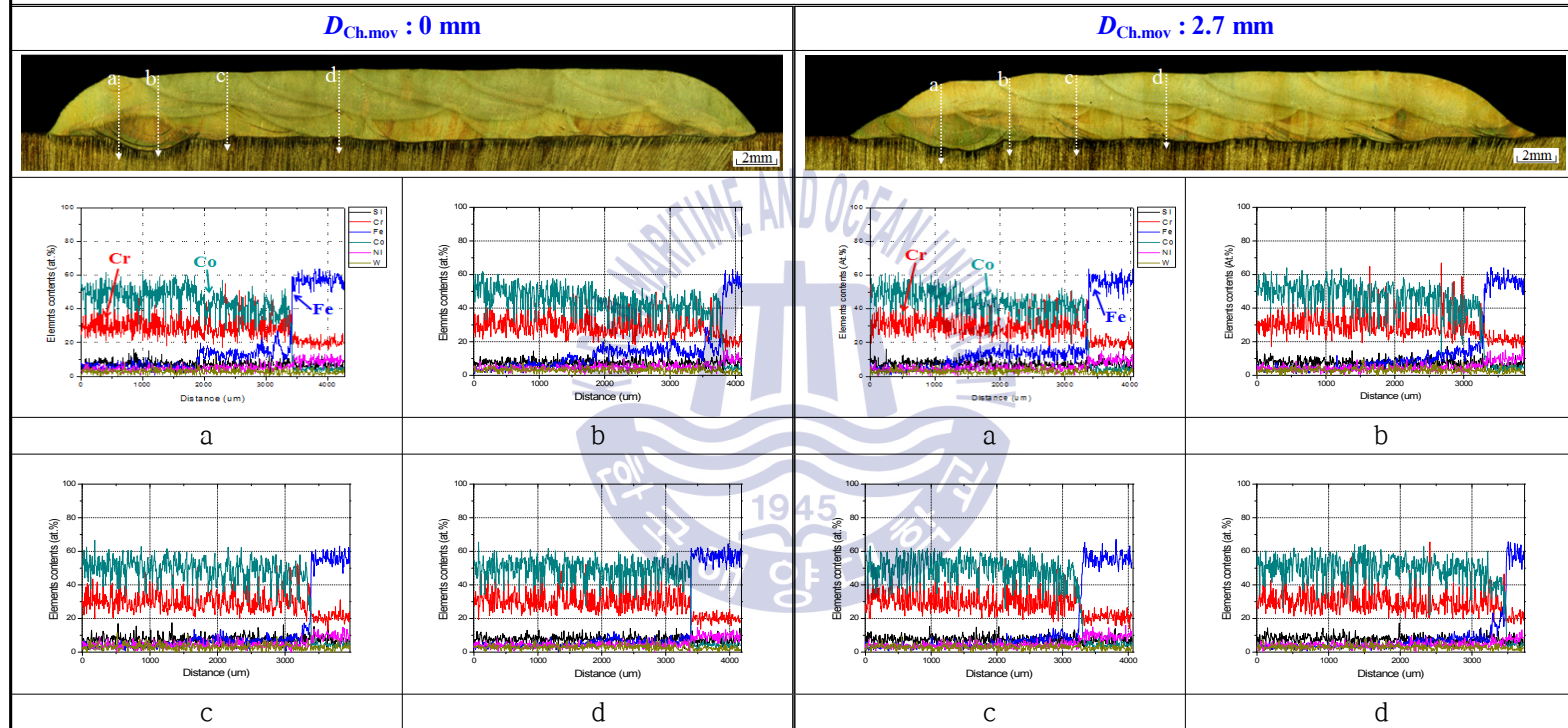


Fig. 4.42 Results of EDS lining analysis along the cross section of multi-layer clad when moving distance of cladding head is 0 mm and 2.7 mm in laser cladding

## (2) 적층 시 클래드 층 표면 온도에 따른 영향

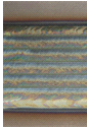



실제 산업 현장에서 클래딩하는 부품은 면적이 넓고 크기가 크기 때문에 실험에 사용되는 시험편의 크기와 형상에 있어서 차이가 발생한다. 실험에 사용된 시험편은 실제 선박용 배기밸브에 사용되는 재료로 냉각 속도와 시험편의 변형 발생 가능성을 충분히 감안하여 두께를 20 mm로 두껍게 하였으나, 지름이 115 mm로 실제 배기밸브보다 사이즈가 상당히 작다. 따라서 크기가 작은 시험편으로 중첩 및 적층 레이저 클래딩 시, 빔 이동거리가 상대적으로 짧아 클래드 층의 표면 온도가 떨어지기 전에 중첩 또는 적층이 되지만 면적이 넓은 시험편 또는 부품의 경우, 빔 이동거리가 길기 때문에 클래드 층이 일부 냉각된 후 중첩 및 적층이 이루어지므로 실제 산업현장과 실험 결과에서 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 적층 시 클래드 층 표면 온도에 따른 영향을 확인하고자 1층 클래드 층이 충분히 냉각된 후 2층 적층하는 경우와 1층 클래드 층 형성 후 바로 적층하는 경우로 나누어 실험을 진행하였다. 실험은 중첩률 10 %와 20 % 두 조건 모두에서 진행하였으며 표면 온도는 형성된 클래드 층의 중앙부를 디지털 온도계(TC-400, LINE SEIKI)로 측정하였다.

2층 적층 시작 전, 중첩률 10 %와 20 %의 1층 클래드 층을 냉각 없이 바로 측정했을 때 210 °C, 217 °C이었으며, 충분히 냉각시킨 후 표면 온도를 측정한 결과 각각 37 °C, 33 °C이었다. Fig. 4.43과 Fig. 4.44에 각 중첩률 조건에서 1층 표면 온도에 따른 클래드 층의 표면과 횡단면, 높이 및 폭 측정값을 나타낸다. 중첩률 10 %에서는 표면 온도에 관계없이 외관과 횡단면에서 두드러지는 차이가 없었으며 높이 약 3.4 mm, 폭 약 36.4 mm로 비슷한 값을 나타내었다. 중첩률 20 %는 10 %와 비슷하게 두 조건 모두 높이 약 3.8 mm, 폭 약 34.0 mm로 외관과 횡단면에서 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 1층 클래드 층 표면온도를 달리하여 각각의 중첩률에 따른 경도분포를 Fig. 4.45와 Fig. 4.46에 나타내었다. 경도는 첫 번째, 두 번째, 네 번째 그리고 마지막 클래드 층의 표면에서부터 깊이 방향으로 측정하였다. Fig. 4.45의 (a) 그래프를 통해 표면 온도가 210 °C로 연속 적층 했을 경우 1층과 2층의 경계층 영역에서 경도가 대폭 감소하였으나, 표면 온도가 37 °C로 충분한 냉각 후 적층을 했을 경우 상대적으로 냉각속도가 빨라졌기 때문에 1층과 2층의 경계층에서 경도가 소폭 감소하여 고른 경도 분포를 나타내고 있는 것을

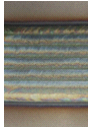

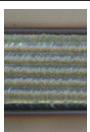

확인할 수 있다. (b)와 (c) 그리고 (d) 그래프에서는 냉각 후 적층했을 때 경도값이 약간 더 높았으나 전체적으로 두 조건 모두 비슷한 분포를 나타내었다. 빔이 0.6 mm 겹치는 중첩률 10 %로 2층 적층 시 1층 클래드 층으로 공급되는 입열량이 높았기 때문에 표면온도에 관계없이 비슷한 경도 분포를 나타내는 것으로 사료된다.

Fig. 4.45의 결과를 통해 중첩률이 20 %일 경우, 1층 표면 온도가 낮을 때 냉각속도가 빨라 전체적으로 경도값이 더 높게 나타났다. 두 조건 모두 1층과 2층 경계부에서 경도가 약 50 Hv정도 감소하였으나 그래도 약 450 Hv 이상의 경도 값을 유지하므로 분말의 특성을 적절하게 잘 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 4.47은 20% 중첩률 조건에서 1층 클래드 층의 표면온도에 따른 EDS 라인 분석 결과로, 동일한 위치에서 클래드 층 표면에서부터 깊이 방향으로 측정하였다. 두 조건 모두 전체적으로 거의 유사한 결과를 나타냈으며, a영역을 제외한 나머지 영역의 1층과 2층에서 성분이 균일하게 분포하였다. 이전 항에서 언급했듯이, 클래딩 진행 시 첫 번째 클래드 층은 다른 부분에 비해 희석이 많이 일어나므로 a 영역의 1층에서 Fe 성분이 높게 측정되었으며 2층 표면으로 갈수록 점차 감소하는 것을 확인하였다. 결과적으로 영역에 관계없이 1층 표면온도에 따라 2층에서의 성분 차이는 발생하지 않았다. 따라서 1층 클래드 층의 표면온도를 달리하여 2층 적층 후 형상과 합금 농도분포에 있어서 차이가 나타나지 않았으며 1층 표면 온도가 낮을 경우 냉각속도 차이로 경도 값이 약간 상승하였으므로 앞으로 적층 실험에서는 냉각 없이 연속적으로 적층을 진행하였다.

SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_S \ \& \ G_C : 20 \ \& \ 8 \text{ l/min(Ar)}$ , $O_{\text{Lap.r}} : 10 \%$		
Photos Temp.(°C)	Surface	Cross section
210 °C (Continuous cladding)		
		Clad layer height( $h$ ) : 3.496 mm      Clad layer height( $w$ ) : 36.375 mm
37 °C (After cooling)		
		Clad layer height( $h$ ) : 3.460 mm      Clad layer height( $w$ ) : 36.419 mm

**Fig. 4.43** Variation of clad characteristics with different 1st layer surface temperature in 2nd layer cladding( $O_{\text{Lap.r}} = 10 \%$ )

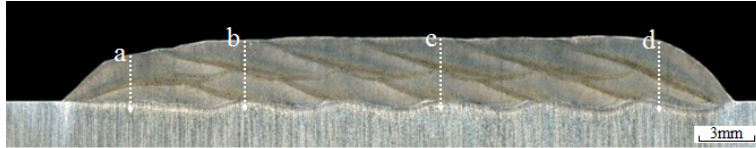
SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_S \ \& \ G_C : 20 \ \& \ 8 \text{ l/min(Ar)}$ , $O_{\text{Lap.r}} : 20 \%$		
Photos Temp.(°C)	Surface	Cross section
217 °C (Continuous cladding)		
		Clad layer height( $h$ ) : 3.807 mm      Clad layer height( $w$ ) : 33.517 mm
33 °C (After cooling)		
		Clad layer height( $h$ ) : 3.884 mm      Clad layer height( $w$ ) : 34.084 mm

**Fig. 4.44** Variation of clad characteristics with different 1st layer surface temperature in 2nd layer cladding( $O_{\text{Lap.r}} = 20 \%$ )

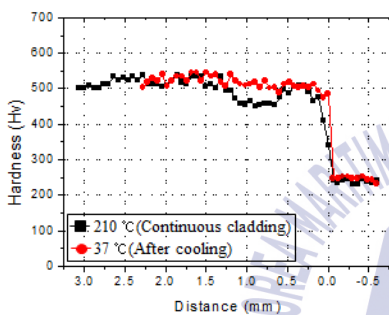


SNCrW – Stellite 6, Multi-pass clad ;

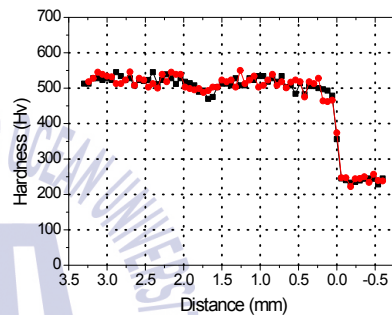
$P : 4 \text{ kW}$ ,  $v : 4 \text{ mm/s}$ ,  $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim20 \text{ g/min})$ ,  $G_S \text{ \& } G_C : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ ,  $O_{\text{Lap. r}} : 10 \%$



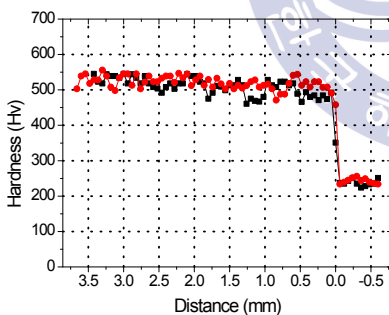
Measuring position of cross section



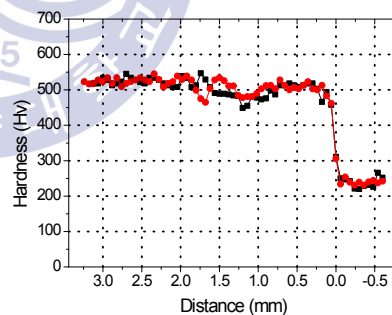
a



b



c



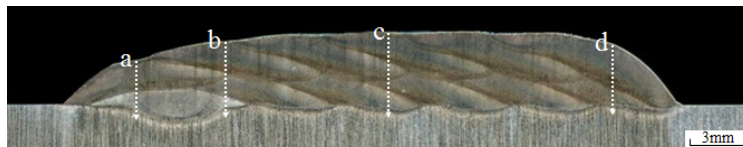
d

Fig. 4.45 Hardness distribution of clad layer with different 1st layer surface temperature in 2nd laser cladding( $O_{\text{Lap. r}} = 10 \%$ )

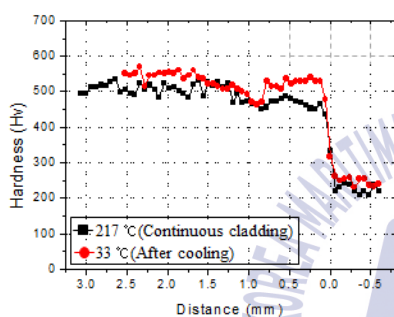


SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ;

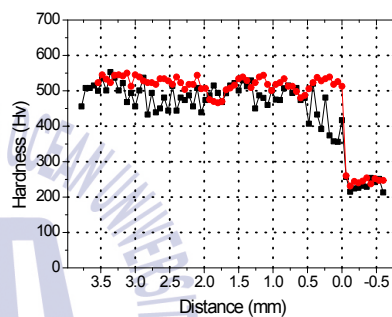
$P : 4 \text{ kW}$ ,  $v : 4 \text{ mm/s}$ ,  $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min),  $G_S \text{ \& } G_C : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ ,  $O_{Lap,r} : 20 \%$



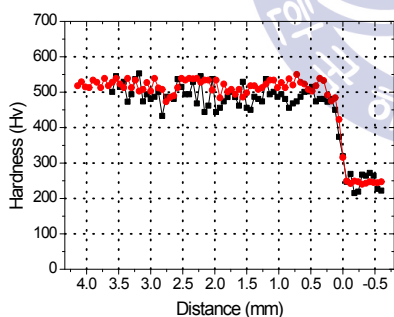
Measuring position of cross section



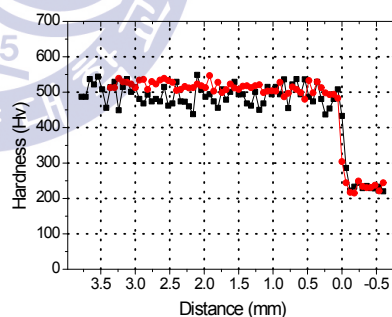
a



b



c



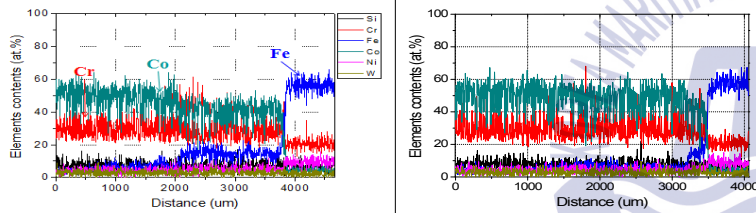
d

Fig. 4.46 Hardness distribution of clad layer with different 1st layer surface temperature in 2nd layer cladding( $O_{Lap,r} = 20 \%$ )

SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ;

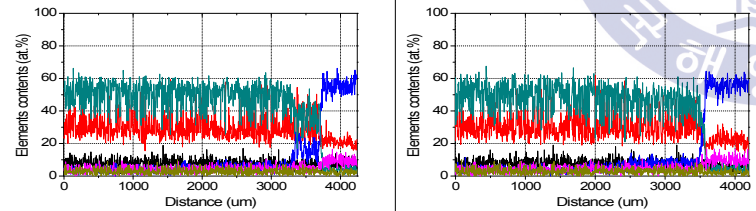
$P : 4 \text{ kW}$ ,  $v : 4 \text{ mm/s}$ ,  $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min),  $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ ,  $O_{Lap, r} : 20 \%$

1st layer surface temperature : 217 °C



a

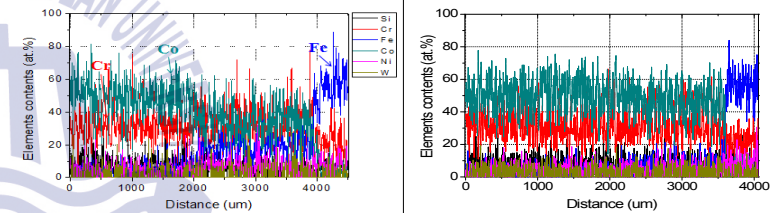
b



c

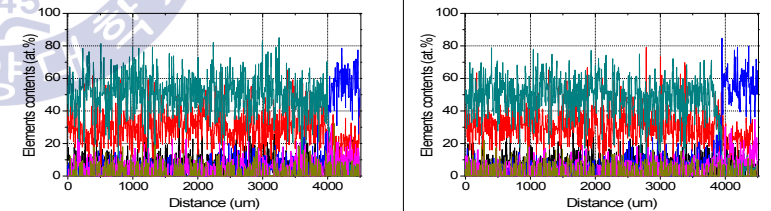
d

1st layer surface temperature : 33 °C



a

b



c

d

Fig. 4.47 Results of EDS lining analysis along the cross section of 2nd layer clad with different 1st layer surface temperature

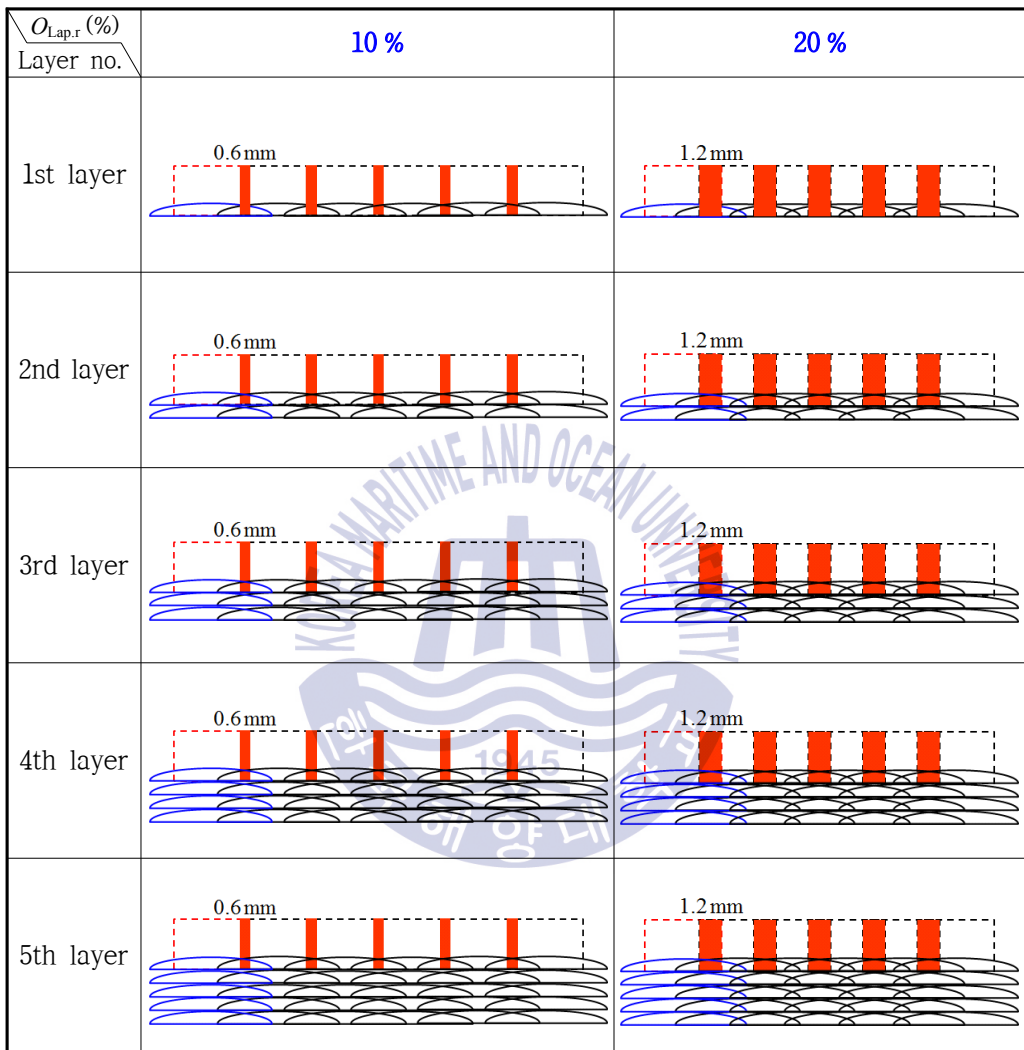
#### 4.2.4 적층 수의 증가에 따른 클래드 층의 단면 형상 관찰

이전 결과를 바탕으로 적층 실험 시 시작위치는 동일하면서 적층 수가 증가할수록 클래드 층에 어떠한 차이가 나타나는지 알아보기 위해 실험을 실시하였다. 1 패스 클래딩에서 레이저 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s, 분말 공급량 19~20 g/min의 조건으로 높이 약 1 mm의 클래드 층을 형성할 수 있었다. 이와 동일한 조건으로 중첩률을 10 %와 20 %로 나누어 클래드 층을 1층에서부터 5층까지 쌓아올렸으며 Fig. 4.48에 실험 진행 모식도를, Fig. 4.49에 클래드 층 표면과 횡단면, 적층 수에 따른 높이 변화 그래프를 나타낸다. 두 중첩률 조건에서 클래드 층을 적층할 때 높이 그래프를 확인한 결과, 1층은 약 1.6~1.9 mm, 2층에서는 3.4~3.8 mm, 3층의 경우 5.3~5.7 mm, 4층은 6.9~7.6 mm, 5층에서는 8.7~9.6 mm로 측정되었으며 클래드 층을 적층할수록 높이가 그에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 중첩률 10 %보다 20 %조건에서 더 높은 클래드 층을 형성할 수 있었으며 적층 수가 증가할수록 높이 차이 또한 커지는 것을 알 수 있다. 첫 번째와 두 번째 클래드 층 형성 시 중첩률에 관계없이 클래드 층의 높이가 거의 일정하며 표면이 균일하게 형성되었지만, 3층과 4층, 5층까지 쌓아올렸을 때 클래드 층의 높이 차이가 발생해 표면이 불균일해졌으며 이러한 현상은 중첩률 20 % 조건에서 더욱 두드러지게 나타났다. 이는 새로운 클래드 층을 쌓아올릴 때, 분말이 기존에 형성된 클래드 층의 첫 번째 클래드 층 모서리 부분에도 공급되면서 충분히 용융되지 않았을 뿐만 아니라 용액이 흘러내려 다른 위치보다 높이가 낮아지게 되었으며 클래드 층이 점차 중첩될수록 다시 높이가 증가하였다. 그러나 마지막 클래드 층에서 다시 분말 용액이 흘러내리게 되면서 높이가 감소하였으며 따라서 표면 높이가 고르지 않게 형성된 것을 알 수 있다.


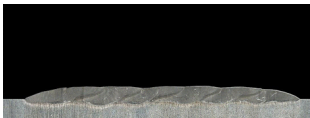


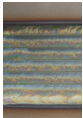

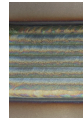

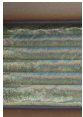

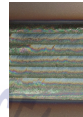

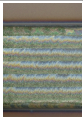

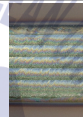

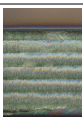

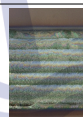

다음은 분말 공급량을 26~27 g/min와 32~33 g/min으로 증가시켜 클래드 층을 쌓아올렸을 때 표면과 횡단면 및 높이 변화 그래프를 Fig. 4.50과 Fig. 4.51에 각각 나타낸다. 1 패스 클래딩 시 출력을 4 kW, 빔 이송속도를 4 mm/s로 고정시키고 분말을 26~27 g/min와 32~33 g/min으로 공급하였을 때 높이 약 1.5 mm, 2 mm의 클래드 층을 형성할 수 있었다. 분말을 26~27 g/min로 공급하면서 중첩률 10 %와 20 %로 클래드 층을 한 번 쌓을 때와 두 번, 다섯 번 쌓아올릴 때 2.1~2.4 mm, 4.2~4.9 mm 그리고 10.7~12.0 mm 높이의 클래드 층을 얻을 수 있었

으며 전과 동일하게 적층 수가 증가할수록 클래드 층의 높이가 더욱더 불균 일해지는 것을 알 수 있었다. 또한 분말 공급량이 19~20g/min일 때 보다 더 높은 클래드 층을 얻을 수 있었으나 동일한 수만큼 클래드 층을 쌓아올렸을 때 20 % 중첩률 조건에서 중첩부 아래쪽 일부에서 기공(inter-run porosity)을 발견할 수 있었다. 분말 공급량을 32~33 g/min으로 더 증가시켜 클래드 층을 1층에서부터 3층까지 쌓아올린 후 높이를 측정한 결과 약 4 mm, 6.5 mm, 10 mm로 많이 쌓아 올리지 않더라도 높은 높이의 클래드 층을 얻을 수 있었지만 중첩부에 기공 이 발생하였으며 Fig. 4.39의 광학 사진을 통해 기공의 모양이 원형이 아닌 것 을 알 수 있다. 따라서 분말 공급량이 많으면 짧은 시간에 높이가 높은 클래드 층을 형성할 수 있으나 중첩부에 기공이 발생하게 되므로 결함 없이 높은 높이의 클래드 층을 형성하기 위해서는 적절한 양의 분말을 공급하면서 클래드 층을 쌓아올리는 적층이 필요하다는 것을 알 수 있다.

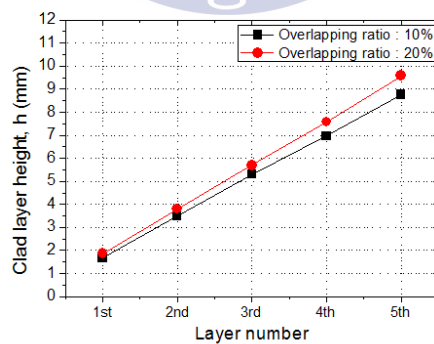




**Fig. 4.48** Schematic diagram of different layer number in multi-layer laser cladding

SNCrW – Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}(19\sim20 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$				
Photos	$O_{Lap,r} : 10 \%$		$O_{Lap,r} : 20 \%$	
Layer no.	Surface	Cross section	Surface	Cross section
1st layer				
2nd layer				
3rd layer				
4th layer				
5th layer				

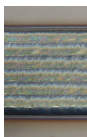

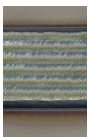

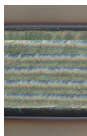

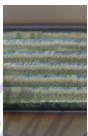



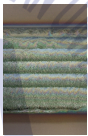

(a) Surface and cross section



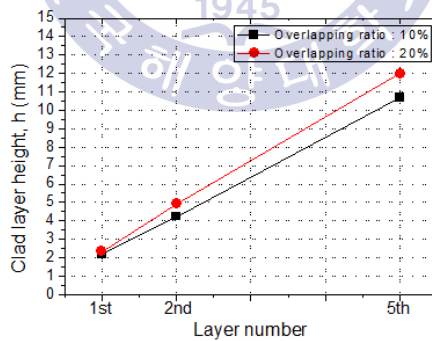
(b) Clad layer height( $h$ )

Fig. 4.49 Variation of clad characteristics with different layer number in multi-layer laser cladding( $R_f = 3 \text{ rpm}(19\sim20 \text{ g/min})$ )



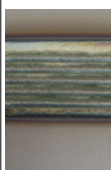
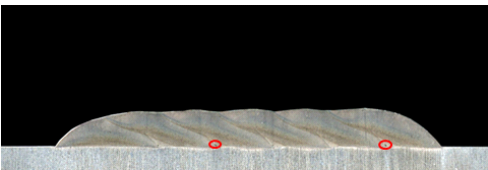

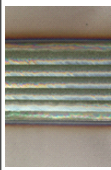
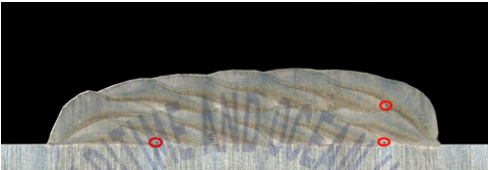


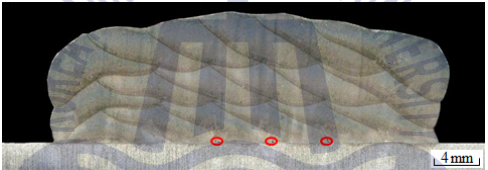
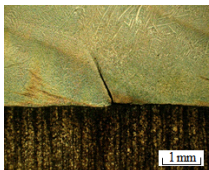
SNCrW – Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 4 \text{ rpm}(26\sim27 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$				
Photos	$O_{Lap,r} : 10 \%$		$O_{Lap,r} : 20 \%$	
Layer no.	Surface	Cross section	Surface	Cross section
1st layer				
2nd layer				
5th layer				

(a) Surface and cross section

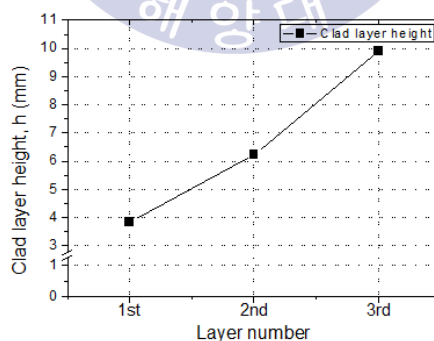


(b) Clad layer height( $h$ )

Fig. 4.50 Variation of clad characteristics with different layer number in multi-layer laser cladding( $R_f = 4 \text{ rpm}(26\sim27 \text{ g/min})$ )

SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 5 \text{ rpm}(32\sim33 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ , $O_{\text{Lap.r}} : 20 \%$			
Photos Layer no.	Surface	Cross section	OM image of inter-run porosity
1st layer			
2nd layer			
3rd layer			

(a) Surface, cross section of clad and OM images of inter-run porosity



(b) Clad layer height( $h$ )

**Fig. 4.51** Variation of clad characteristics with different layer number in multi-layer laser cladding( $R_f = 5 \text{ rpm}(32\sim33 \text{ g/min})$ )

### 4.3 클래드 층의 기계적 성질 및 조직특성 분석

#### 4.3.1 1 패스 클래드 층의 경도분포

1 패스 클래드 층의 공정변수에 따른 기계적 성질을 평가하기 위해 경도를 측정하였다. 경도는 클래드 층 표면에서  $15\mu\text{m}$  떨어진 지점부터 종방향으로  $60\mu\text{m}$  간격을 두어 측정하였으며 경도 분포를 세밀하게 파악하기 위해 마이크로 비커스 경도기를 사용하였다(분석방법 참조). 내열강 SNCrW의 모재 경도는 대략 200~255 Hv 정도이다. 레이저 출력 및 빔 이송속도에 따른 회석률 및 경도 분포를 Fig. 4.52와 Fig. 4.53에 나타낸다. 이송속도가 4 mm/s일 때 출력이 증가할수록 회석률이 증가하는 것을 알 수 있었고 이와 같은 경향을 경도 분포에서도 확인할 수 있었다. 출력이 2 kW로 낮을 때, 클래드 층의 경도는 480~530 Hv으로 모재 경도보다 약 2.5배 증가하였지만 출력이 증가할수록 클래드 층의 경도가 점차 감소하였다. 클래드 분말의 경도 값이 PTA로 2층 용접 시 로크웰 경도 42 HRC(420 Hv)이므로 클래드 층의 경도는 분말의 특성에 유효한 값을 나타낸다. 클래드 층에서 전체적으로 경도 값이 거의 일정 범위에서 분포하지만 모재와 클래드 층 사이 경계층 부근에서 점차 감소하는 경향을 확인할 수 있으며 출력이 클 때 이러한 경향이 두드러지게 나타났다. 출력이 5 kW일 때는 모재 성분의 회석이 증가하여 클래드 층의 경도는 380~450 Hv을 나타내었으며, 이때의 경도 값은 분말 표준 경도 값보다 작기 때문에 분말의 특성을 적절하게 나타내지 않는 조건임을 확인할 수 있다. 출력이 4 kW일 때 이송속도가 증가할수록 단위 길이 당 공급되는 분말량 및 빔 에너지가 감소하게 되고 상대적으로 분말량의 감소폭이 더 크기 때문에 회석률은 약간 증가하게 된다. 하지만 회석률 차이는 미미하며 클래드 층의 경도 또한 430~480 Hv으로 거의 비슷한 분포를 나타내었다. 빔 이송속도에 따라 클래드 층의 경도 분포는 유사하였으며, 생산성 및 클래드 층의 크기를 고려했을 때 4mm/s가 적당한 빔 이송속도였다.

분말 공급량에 따른 클래드 층의 경도 분포를 확인하고자 전과 동일한 방법으로 경도를 측정하였으며 그 결과를 회석률 그래프와 함께 Fig. 4.54에 나타낸다. 분말 공급량이 증가할수록 모재 용융 면적이 감소하여 회석률은 급격하게 감소하였다. 분말 공급량이 7~8 g/min(1 rpm)일 때 클래드 층의 경도는 380~430 Hv로

평균 약 403 Hv, 14~15 g/min(2 rpm)일 때 410~450 Hv로 평균 약 437 Hv, 19~20 g/min(3 rpm)일 때 430~480 Hv로 평균 약 443 Hv, 26~27 g/min(4 rpm)에서 440~510 Hv, 평균 약 477 Hv, 32~33 g/min(5 rpm)에서 450~520 Hv, 평균 약 494 Hv로 전체적으로 모재 경도의 2~3배 정도 증가하는 것을 알 수 있다. 분말 공급량이 적을 때는 모재 용융량이 많아지고, 따라서 클래드 층과 모재간의 희석이 증가하게 되어 클래드 재료의 특성을 나타내지 못하게 된다.

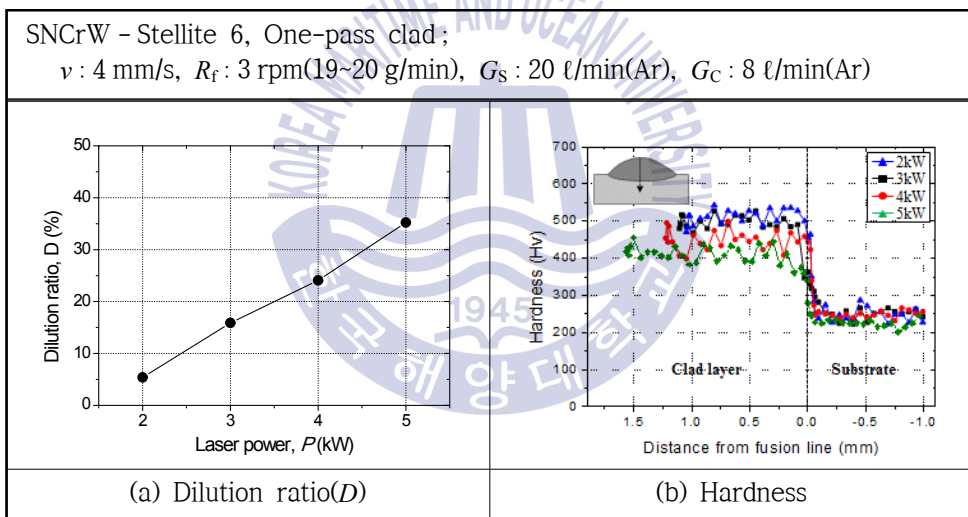


Fig. 4.52 Variation of dilution ratio and hardness with laser power

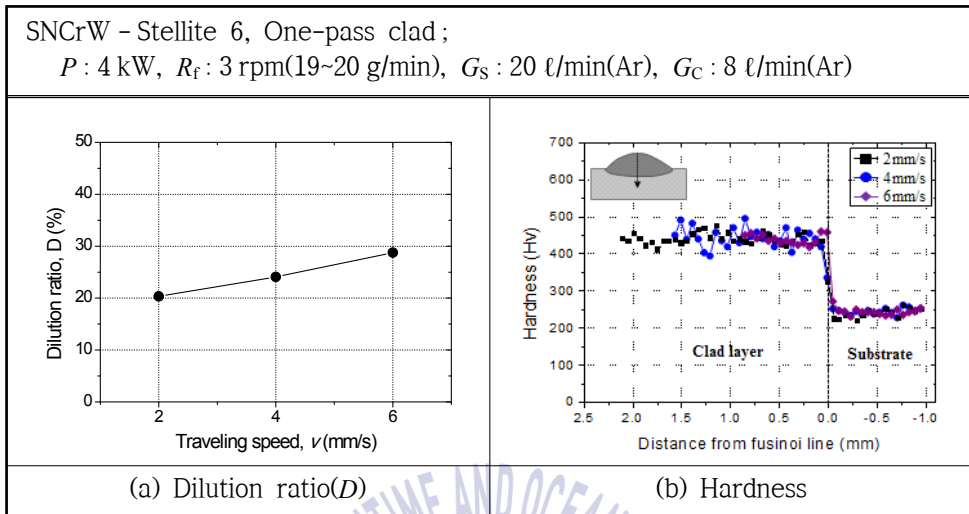


Fig. 4.53 Variation of dilution ratio and hardness with traveling speed

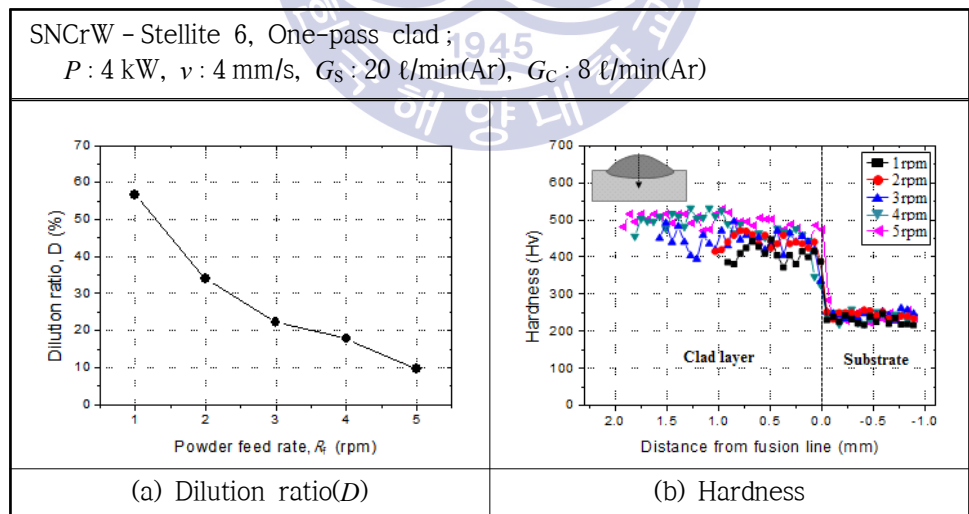


Fig. 4.54 Variation of dilution ratio and hardness with powder feed rate

### 4.3.2 1 패스 클래드 층의 미세조직 및 성분분석

#### (1) 1 패스 클래드 층의 미세조직 분석

2~5 kW의 범위에서 출력을 변화시켜 1 패스 레이저 클래딩 후 클래드 층의 상부와 경계층, 모재로 나누어 광학현미경으로 관측하였다. 출력에 따른 클래드 층의 횡단면과 각 부분에서의 미세조직 확대 사진을 Fig. 4.55에 나타낸다. 횡단면의 광학현미경 사진을 통하여 출력이 증가할수록 모재의 용융깊이가 깊어지는 것을 뚜렷하게 확인할 수 있었으며, 폭이 넓어지고 높이가 감소하는 것 또한 알 수 있었다. Fig. 4.55 중 A영역은 클래드 층 상부로, 이 부분을 200배 배율로 확대하여 A'로 나타냈으며 B영역은 모재와 클래드 층의 경계층으로 B'로 확대하여 나타냈다. 모재는 오스테나이트 조직이며, stellite 6 분말을 이용하여 형성된 클래드 층에서는 균열이 없는 덴드라이트 형상의 미세조직을 나타낸다. 3 kW, 4 kW, 5 kW 출력 조건의 경우 클래드 층 상부에서 미세조직이 표면층을 향하여 성장하였으나 2 kW의 출력 조건에서는 빠른 냉각속도로 인해 클래드 층 상부에서 여러 방향성을 나타내는 조직이 형성되는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 출력이 증가할수록 냉각 속도가 느려져 수지상거리(dendritic arm spacing, DAS)가 조대한 덴드라이트 구조가 나타나는 것 또한 알 수 있었다. 그리고 모든 출력 조건에서 클래드 층과 모재 사이에서 금속학적인 결합이 이루어진 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4.56은 레이저 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s, 분말 송급량 19~20 g/min의 조건에서 1 패스 클래딩 후 광학현미경과 주사전자현미경을 이용하여 클래드 층의 미세조직을 부위별로 관찰한 결과이다. (I)~(III)은 광학현미경으로 관측한 미세조직이며, (I')~(III')와 (I'')~(III'')은 SEM을 이용하여 각 부위 조직을 더 자세하게 관찰하였다. 온도 구배(G)와 결정 성장속도(R)에 의해 미세조직은 평면응고 조직에서 셀형 수지상, 주상 수지상과 등축 수지상 그리고 방향성 잃은 수지상으로 변화한다. 레이저 조사 시 모재와 분말이 용융되어 모재 상에 용융풀이 형성하고 급속하게 응고한다. 이때 용융풀의 바닥에서 온도 기울기가 최대이고 결정 성장속도는 최소가 되어, 평면응고 조직(planar crystal)이 먼저 형성하게 된다. 고액계면이 이동하면서 온도 구배는 감소하고 결정 성장속도는 빨라지면서 응고 조직은 평면응고조직에서 셀형 수지상(cellular dendrite)으로 변화하는 것을 (c) III의 사진을 통해 확인할 수 있다. (a) I 은 클래드 층의 표면 부근으로 용융풀의 바



닥부분이 응고하기 시작할 때, 용융풀 상부는 공기와 접촉하면서 동시에 하부의 응고된 부분에도 접촉하게 되어 온도구배의 방향 변화로 방향성을 잃은 덴드라이트가 형성된 것을 나타낸다. (b) II 클래드 층의 중앙부는 주상 수지상(columnar dendrite)과 등축 수지상(equiaxed dendrite)으로 이루어져 있으며 용융풀 바닥에서 상부까지 응고속도는 표면에서 바닥까지의 응고속도보다 빠르기 때문에 클래드 층 표면을 향해 결정이 성장하고 있는 것을 알 수 있다<sup>45)</sup>. Fig. 4.57을 참조하여 (b) II 클래드 층의 중앙부의 2차 수지상간거리는 약  $6.09\ \mu\text{m}$ 으로 미세한 형태를 나타내었다.



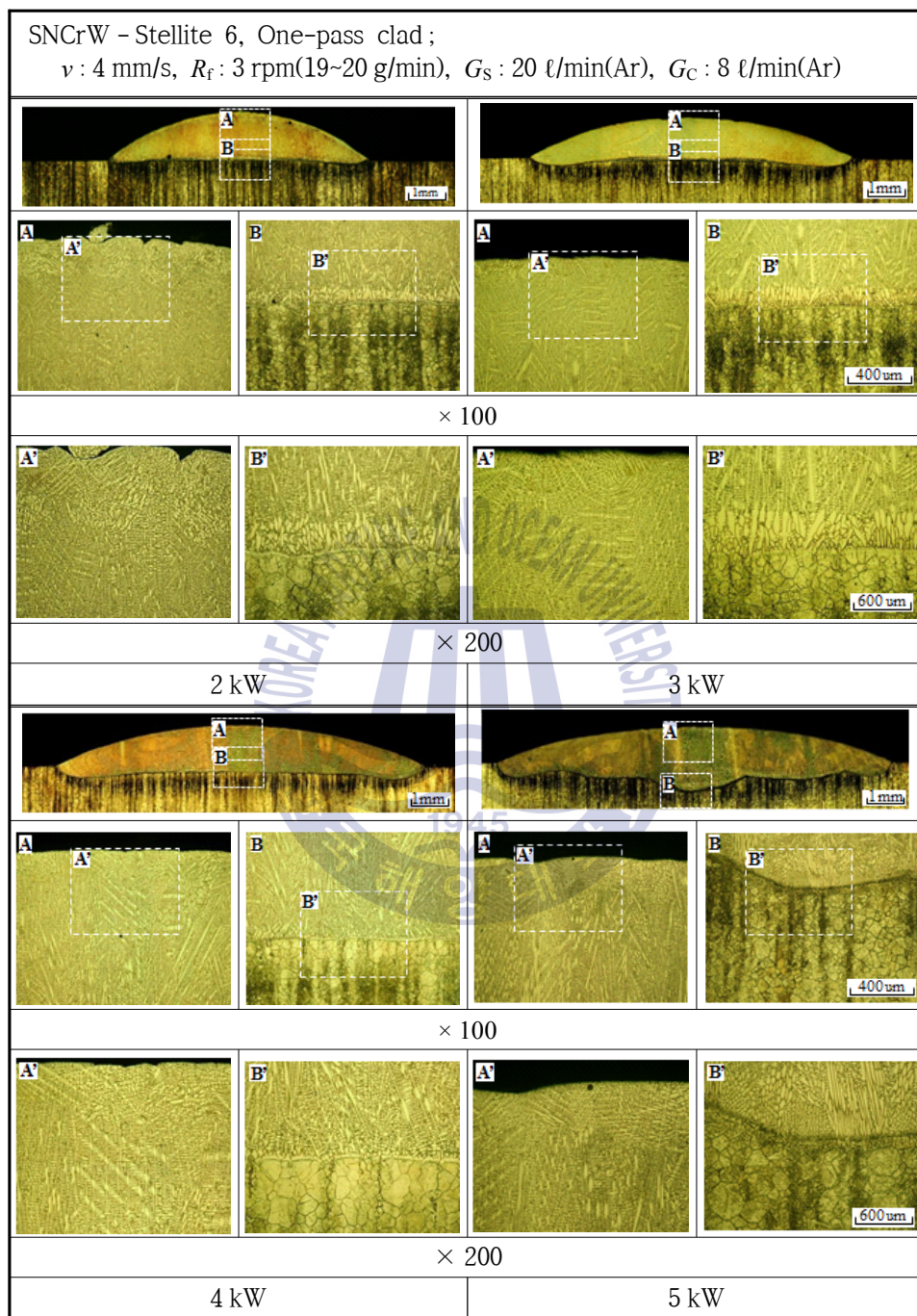
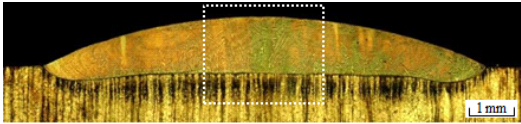
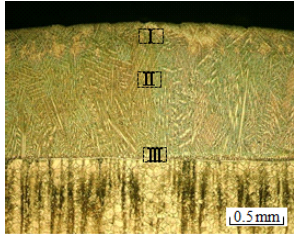
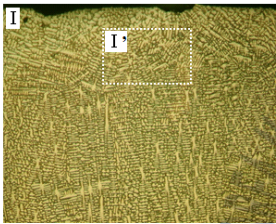
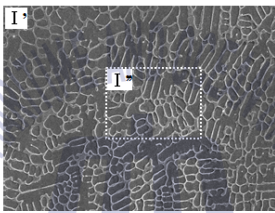
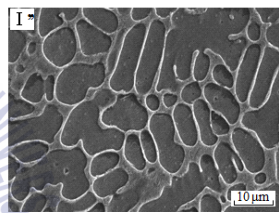
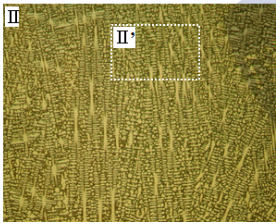
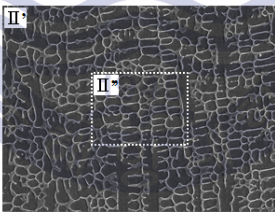
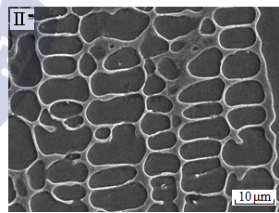
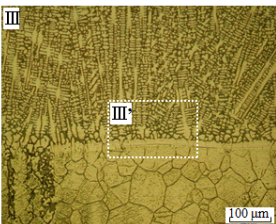
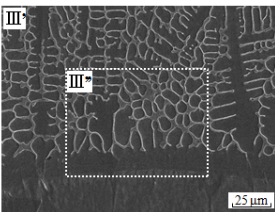
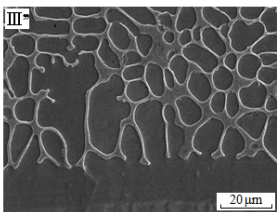


Fig. 4.55 Microstructure of clad with laser power in laser cladding

SNCrW - Stellite 6, One-pass clad; $P: 4 \text{ kW}$ , $v: 4 \text{ mm/s}$ , $R_f: 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_s \text{ \& } G_c: 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$	
	
Cross-section	OM image( $\times 50$ )

OM image( $\times 200$ )	SEM image( $\times 1,000$ )	SEM image( $\times 3,000$ )
		
(a) Near surface		
		
(b) Around center		
		
(c) Near interface		SEM image( $\times 2,000$ ) of (c)

**Fig. 4.56** Cross section and microstructure observed by OM and SEM in clad layer

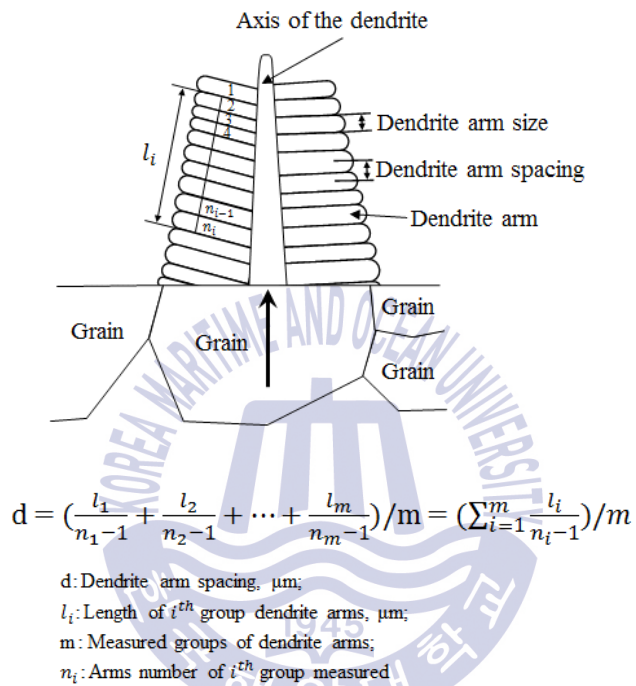


Fig. 4.57 Morphology and measurement of dendrite arm spacing



## (2) 1 패스 클래드 층의 성분분석

레이저 클래딩은 다른 클래딩기술에 비하여 낮은 회석률로 클래드 층을 형성할 수 있다. 하지만 1 패스 클래드 층은 프로세스 진행의 특성상 동일한 조건에서 멀티 패스 클래드 층에 비하여 회석률이 높다는 것을 이전 결과를 통하여 확인할 수 있다. 출력이 증가할수록 회석률 또한 상승하였으며 이러한 경향은 경도 분포에서도 동일하게 나타났다. 따라서 출력에 따른 성분 분포를 비교하기 전, 클래드 층의 부위별 조직 차이에 따른 성분 분석을 실시하였다. Fig. 4.58과 Fig. 4.59는 1 패스 클래드 층 단면의 표면 부근을 OM과 SEM으로 관찰한 사진과 EDS를 통해 점 분석(dot analysis)한 결과이다. 클래드 층 표면 부근은 방향성을 잃은 덴드라이트 구조로 덴드라이트 기지와 덴드라이트 사이 영역에서 성분 차이를 확인할 수 있었다. 덴드라이트 기지상인 1번과 4번에서는 Co가 높게 나타났으며 반면, 2번과 3번은 덴드라이트 사이에  $\text{Cr}_7\text{C}_3$ 와  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ 의 크롬탄화물의 형성으로 인해 크롬 함유량이 가장 높게 나타났으며 C량 또한 증가하였다. Fe은 덴드라이트 기지상에 더 많은 양이 존재하였으며 나머지 Ni, W 및 Si는 거의 비슷하게 분포하였다. Fig. 4.60은 클래드 층 단면의 중앙부를 OM 및 SEM을 이용하여 관찰한 사진이며, Fig. 4.61은 이 부분을 EDS 점 분석한 결과이다. 단면 사진을 통해 클래드 층 상부의 방향성을 잃은 덴드라이트 형상과 달리 표면을 향하여 덴드라이트 성장하는 것을 확인할 수 있다. 1번과 4번은 덴드라이트 기지상으로 Fig. 4.59의 결과와 비슷하게 Co가 높게 나타났으며 2번과 3번에서는 Cr과 C량이 증가하는 것을 알 수 있다. 모재의 회석은 클래드 층 상부보다 중앙에서 더 많이 발생하므로 Fe과 Ni의 함유량이 증가하였으며 Co의 양이 감소하였다. 클래드 층 단면의 하부와 경계층 부분의 OM, SEM 사진과 이 부분의 EDS 분석 결과를 Fig. 4.62와 Fig. 4.63에 나타내었다. 모재와 클래드 층 사이에 두께 약  $15\mu\text{m}$ 의 경계층이 형성되었으며 이를 통해 우수한 금속학적 결합이 이루어져 있다는 것을 알 수 있다. 경계층 주위 덴드라이트 기지상인 1번에서는 이전보다 더 감소한 Co와 더 증가한 Fe 함유량을 할 수 있다. Fig. 4.61의 결과값과 큰 차이는 없으나, 클래드 층 상부 영역의 분석 결과를 나타내는 Fig. 4.59와는 두드러지는 차이를 나타내었다. 모재 성분의 회석이 일어나면서 Fe 이외에 Cr과 Ni도 회석됨으로써 2번의 Cr량이 감소하지 않은 것을 알 수 있으며 3번과 4번이 속한 경계층에서는

Fe 성분이 훨씬 더 증가하였으며 Co 또한 더욱 감소하였다.

SEM-EDS 점 분석을 통해 클래드 층의 위치 및 조직 차이에 따른 성분을 확인할 수 있었으며 출력에 따른 희석률 변화가 클래드 층 단면의 성분 분포에 미치는 영향을 확인하기 위해 EDS 라인 분석(line analysis)을 실시하였다. 분말의 주성분은 코발트(Co)이며 실리콘(Si), 크롬(Cr), 철(Fe), 니켈(Ni), 텅스텐(W), 탄소(C)가 포함되어 있으므로 C를 제외한 모든 성분에 대해 라인분석을 진행하였다. Fig. 4.64는 출력에 따른 횡단면 광학현미경 사진과 클래드 층의 상부부터 깊이 방향으로 성분 분석 결과를 나타낸다. 성분 분포 그래프를 통해 출력이 상대적으로 낮은 2 kW의 경우 클래드 층에서 Co의 양은 약 50~60 %이며, Fe의 양은 약 10 % 미만으로 나타났다. 하지만 출력이 증가할수록 모재의 주성분인 Fe의 희석률이 증가하여 클래드 층에서 Co의 양은 감소하고 Fe의 양이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 출력이 낮을 때 모재 표면과 인접한 클래드 층에서 Fe의 양이 점차 증가하였으며 이를 통해 모재와의 희석이 클래드 층 하부 일부분에서만 이루어진 것을 알 수 있다. Co는 클래드 층의 상부와 중앙에서 거의 일정하다가 클래드 층 하부와 경계층에서 급격히 감소하여 모재에서의 Co 성분이 거의 존재하지 않는다는 것을 Fig. 4.64의 그래프에서 확인할 수 있다. 반면 출력이 증가할수록 클래드 층 표면까지 철 성분이 높게 검출되어 클래드 층 전체가 희석되는 것을 알 수 있으며 클래드 층과 모재 사이 경계층에서 Fe 성분이 급격하게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. Co도 클래드 층 표면에서부터 경계층까지 일정하게 분포하였으며 모재에서는 거의 분포하지 않았다.

희석률의 정의는 기존의 많은 논문에서 일반적으로 전체 용융부에 대한 모재 용융부의 비율로 하였으나, EDS 성분 분석 결과 출력이 커질수록 클래드 층 전체가 희석되는 것을 알 수 있었기에 본 연구에서는 1 패스 클래드 층에서 희석층(dilution layer)을 접합층(bonding layer)으로 바꾸어 표현하였다. 따라서 출력이 커질수록 접합층의 길이 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

출력 변화뿐만 아니라 분말 공급량에 따른 EDS 라인 분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 4.65에 나타낸다. 기존의 희석률 개념을 그대로 적용했을 때, 분말 공급량이 7~8 g/min, 19~20 g/min, 32~33 g/min으로 증가할 경우 희석률은 56.6 %, 22.0 %, 9.5 %로 감소하였다. 라인 분석 결과 분말 공급량이 7~8 g/min일 때 희



석률이 50 % 이상으로 클래드 층 전체에 철의 상당량이 희석되어 약 40 % 정도 측정되었으며 Co보다 더 높은 양을 나타냈다. 분말 공급량이 증가하여 19~20 g/min일 때 Fe의 양은 약 20 % 정도로 감소하였고 Co양이 증가하여 Fe 보다 더 높게 측정되었다. 32~33 g/min으로 분말량을 더 증가시키면 Co 성분이 약 50~60 %이며 Fe은 약 10 % 미만으로 분말 공급량이 증가할수록 분말이 흡수하는 빔 에너지가 증가하고 모재로 흡수되는 에너지가 감소하여 클래드 층에서의 Fe 성분이 감소한 것으로 생각되며 접합층의 길이 또한 짧아지는 것을 확인할 수 있었다. 출력 및 분말 공급량에 따른 클래드 층의 성분 분포는 분말의 주성분인 Co와 모재의 주성분인 Fe의 양에서 뚜렷한 차이가 나타났으며, 이외의 나머지 성분에서는 차이가 거의 나타나지 않았다.



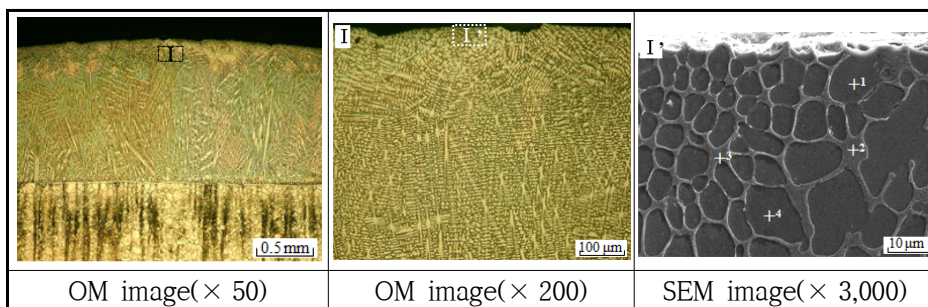


Fig. 4.58 OM and SEM images of near surface zone on one-pass clad layer

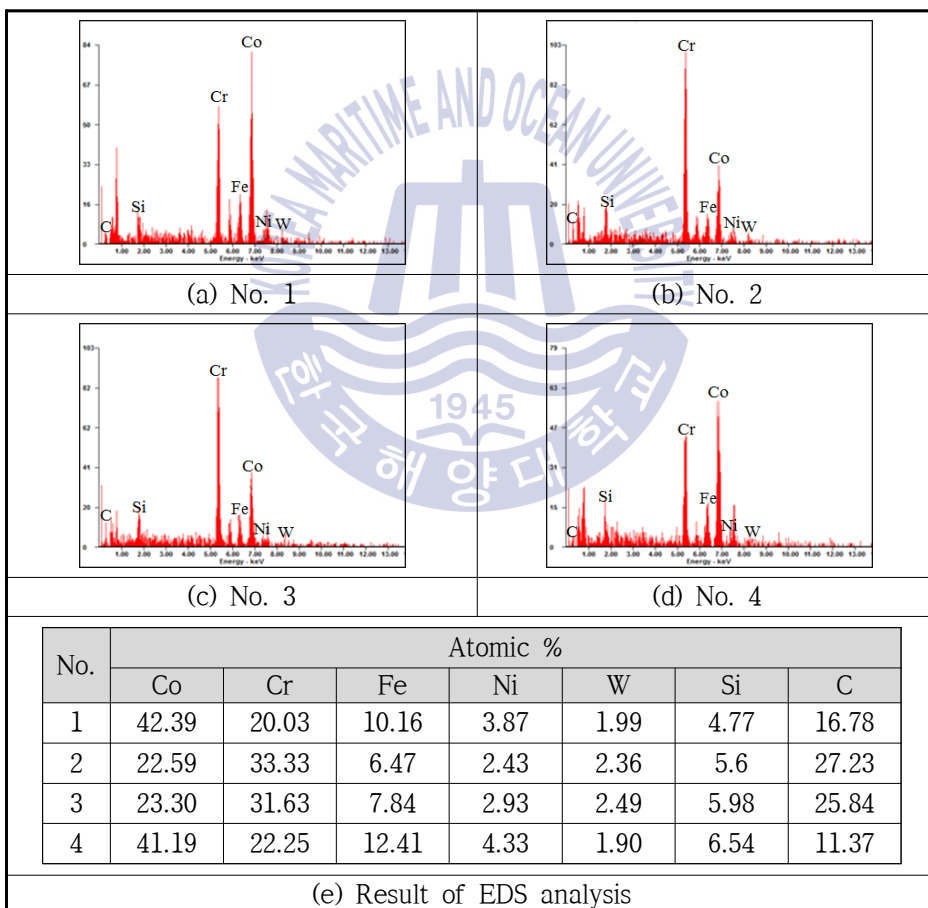


Fig. 4.59 Results of EDS analysis of near surface zone on one-pass clad layer

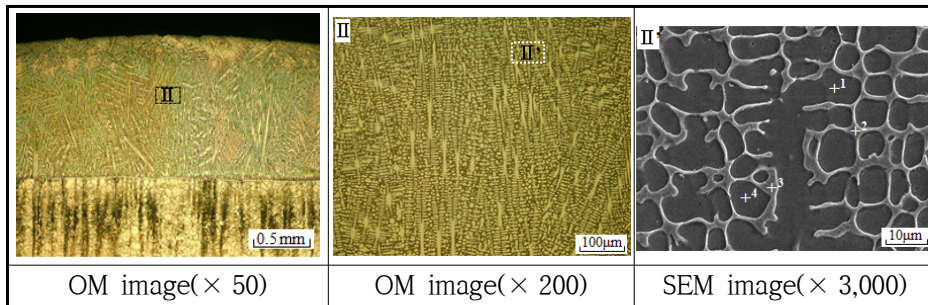


Fig. 4.60 OM and SEM images of around center zone on one-pass clad layer

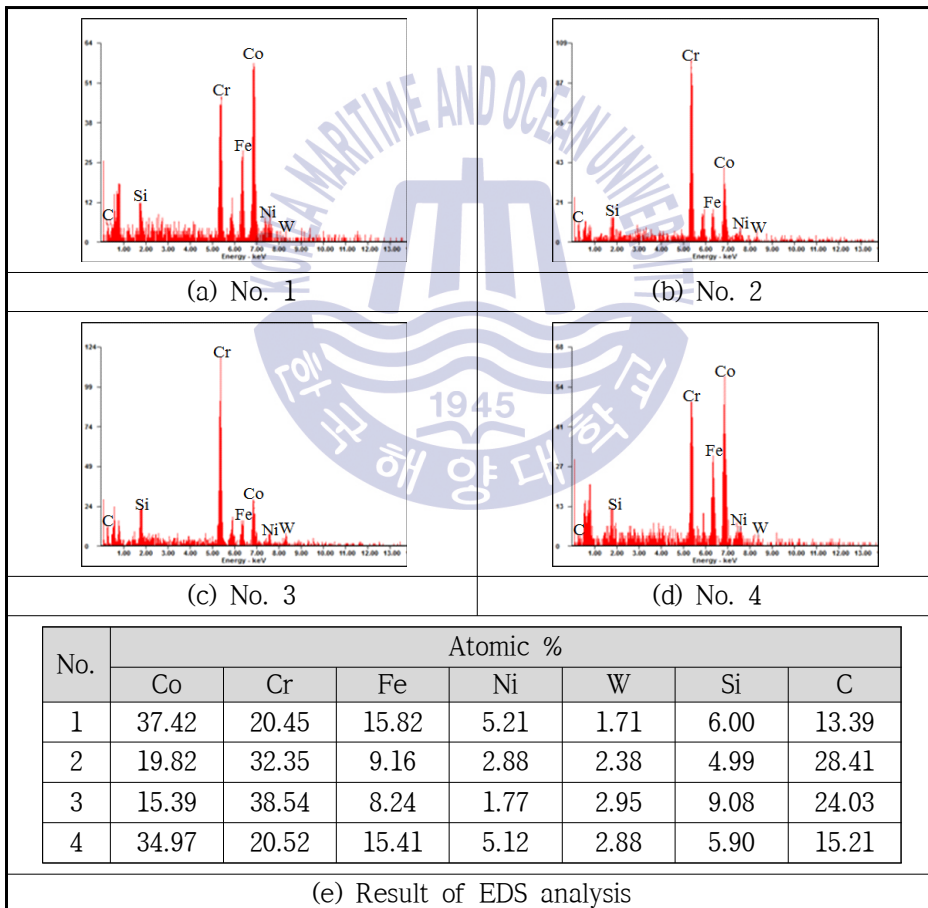


Fig. 4.61 Results of EDS analysis of around center zone on one-pass clad layer

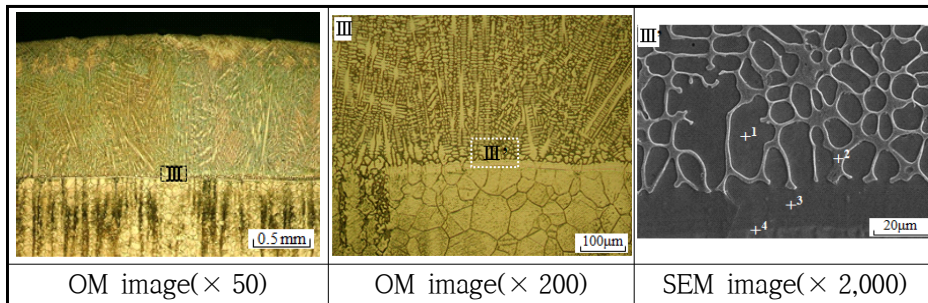


Fig. 4.62 OM and SEM images of near interface zone on one-pass clad layer

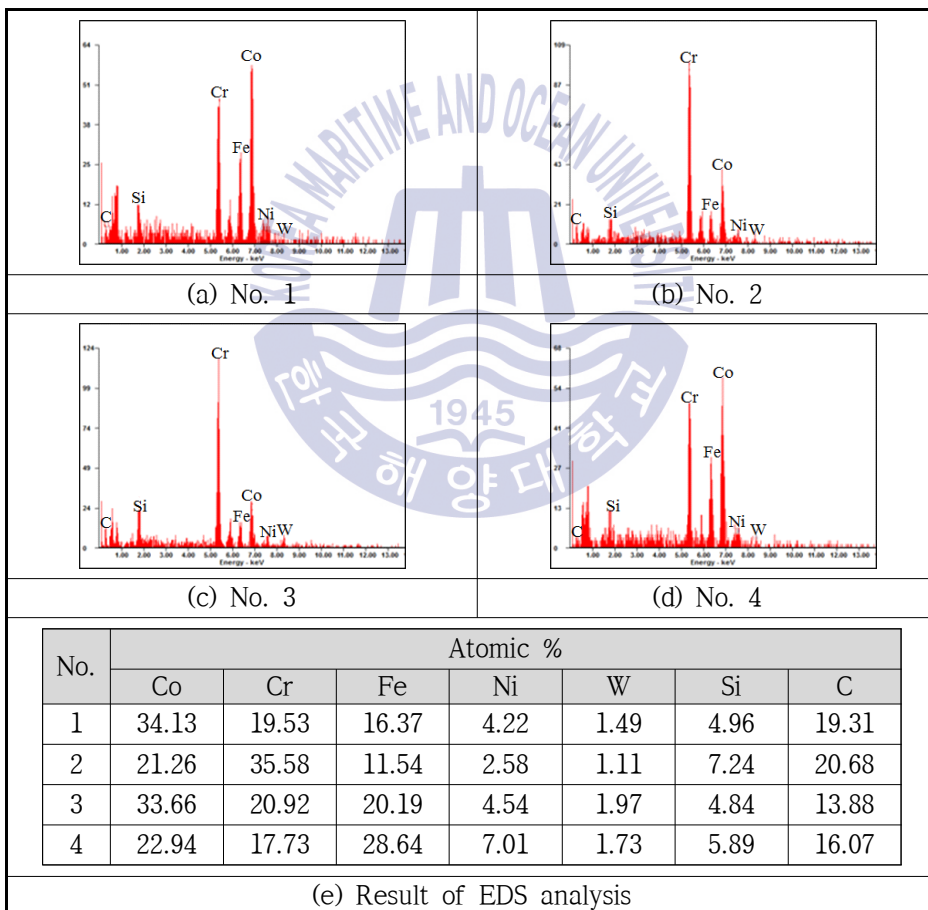


Fig. 4.63 Results of EDS analysis of near interface zone on one-pass clad layer

SNCrW - Stellite 6, One-pass clad ;

$v$  : 4 mm/s,  $R_f$  : 3 rpm(19~20 g/min),  $G_s$  : 20 ℓ/min(Ar),  $G_c$  : 8 ℓ/min(Ar)

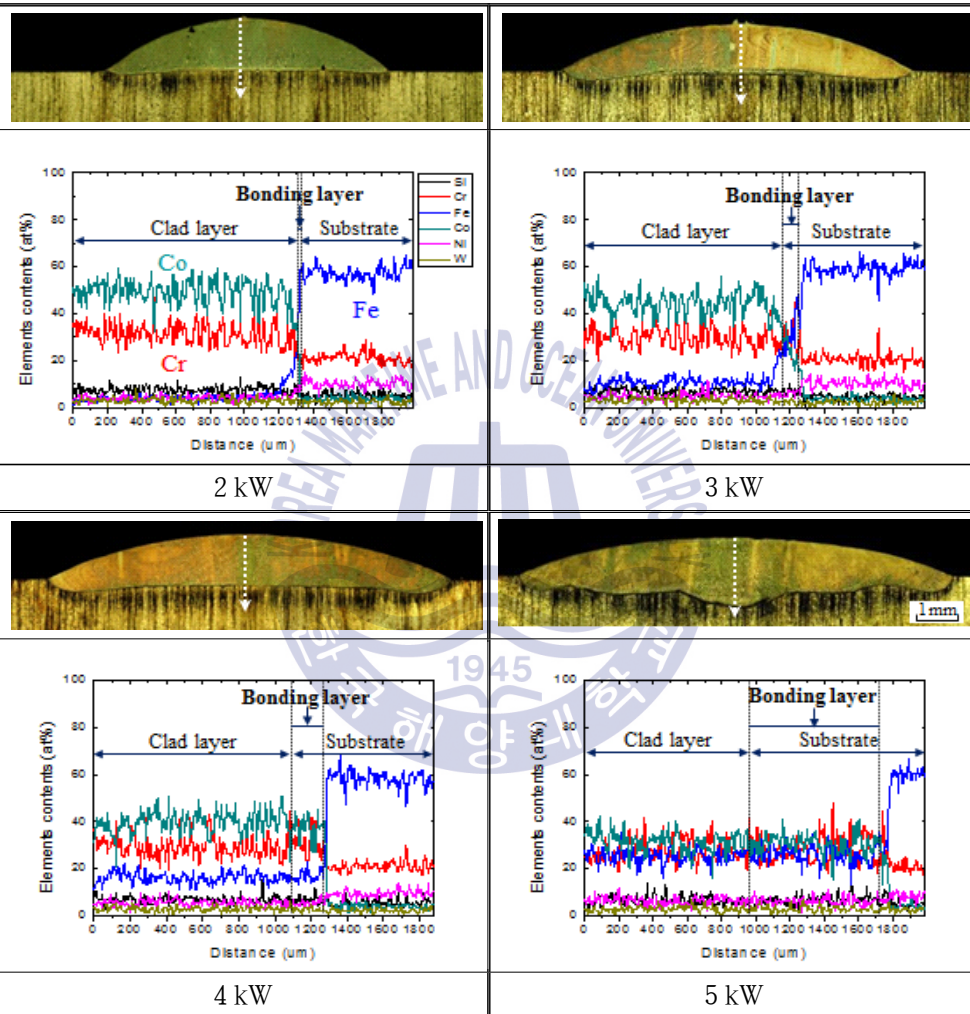


Fig. 4.64 Results of EDS lining analysis along the cross section of clad with laser power in laser cladding

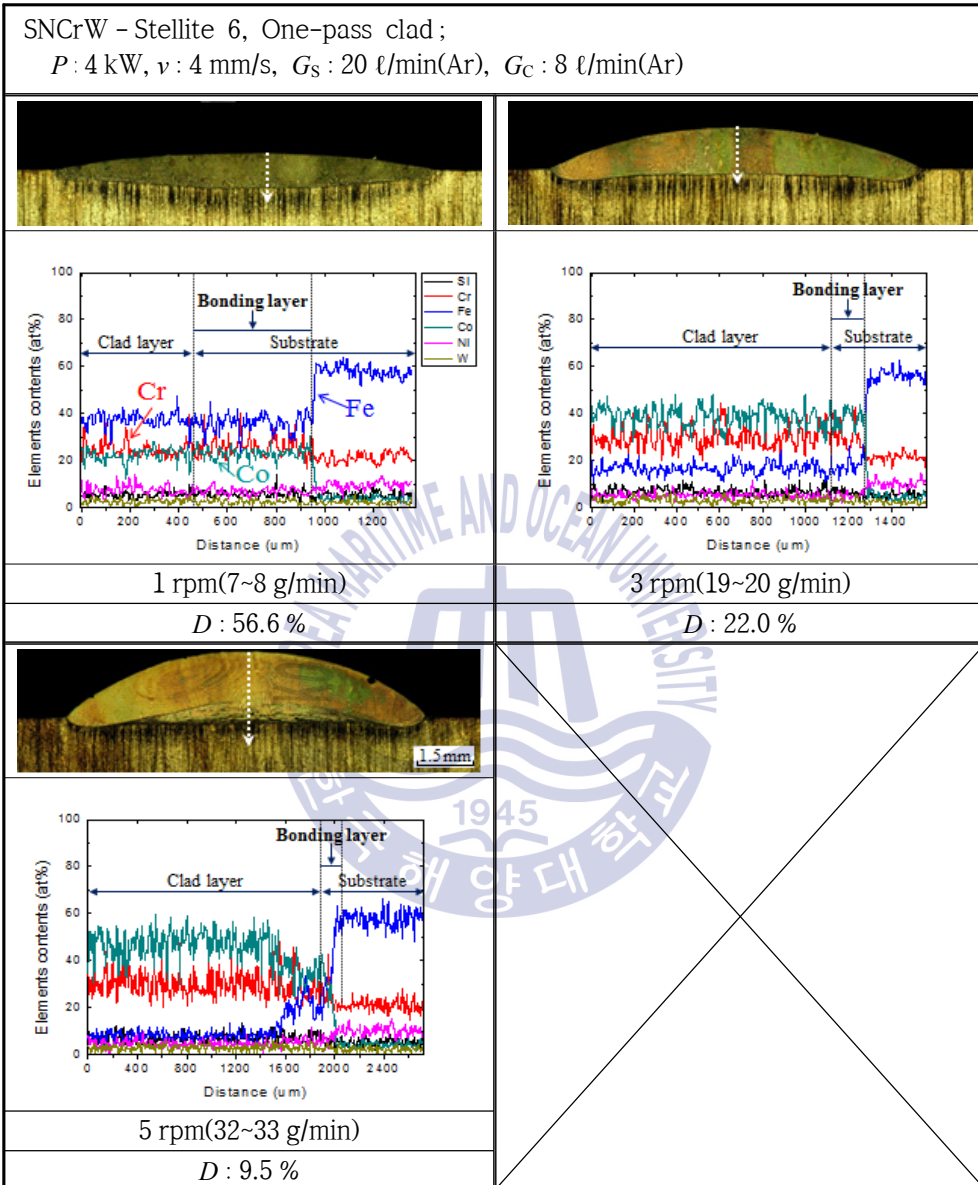


Fig. 4.65 Results of EDS lining analysis along the cross section of clad with powder feed rate in laser cladding



### 4.3.3 멀티 패스 클래드 층의 경도분포

레이저 출력, 빔 이송속도 및 분말 공급량을 일정하게 고정하고, 중첩률 및 적층 수에 따른 물성 변화를 확인하기 위해 경도를 측정하였다. 1 패스 클래드 층은 표면에서부터 깊이방향으로만 경도 측정을 실시하였으나, 중첩 및 적층이 이루어진 경우, 클래드 층과 층 사이 겹치는 영역에서의 경도분포를 확인하기 위해 종방향과 횡방향으로 나누어 측정하였다

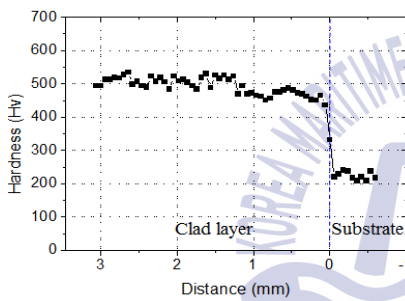
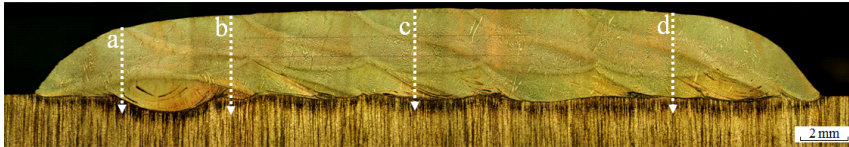
#### (1) 종방향 경도분포

모재 경도는 대략 200~255 Hv 정도이며, 4 kW, 4 mm/s, 19~20 g/min의 조건에서 20 % 중첩률로 얻어진 1층 멀티 패스 클래드 층의 단면사진과 종방향 경도분포를 4.2.1항의 Fig. 4.27에 나타내었다. 첫 번째 클래드 층의 측정 결과인 그래프 a는 다른 b, c, d그래프보다 클래드 층의 평균 경도값이 작게 측정되었다. 첫 번째 클래드 층의 평균 경도가 443 Hv 정도 이었으나 b, c, d 그래프에서는 평균 473 Hv, 482 Hv, 494 Hv으로 약 30~50 Hv 정도 상승하였다. 중첩 시 모재에 조사되는 빔의 특성 상, 첫 번째 클래드 층의 모재의 용융량이 다른 클래드 층에 비해 상대적으로 증가하여 경도 값이 보다 감소하였다.

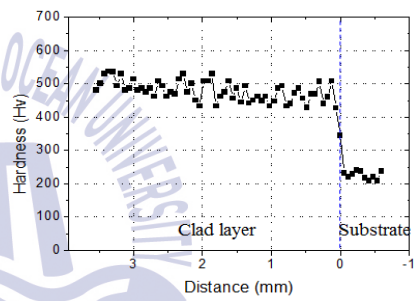
전과 동일한 조건으로 클래드 층을 2층에서 5층까지 쌓아올린 후 1층 멀티 패스 클래드 층의 경도 측정 방법 및 위치와 동일하게 경도를 측정하였다. Fig. 4.66과 Fig. 4.67은 2층과 5층 멀티 패스 클래드 층의 측정위치와 경도그래프를 나타낸다. 두 조건 모두 첫 번째 클래드 층의 상부에서는 경도 값이 약 500 Hv 이상으로 유지되었으나 1층에서 경도가 감소하여 Fig. 4.27의 첫 번째 클래드 층 경도 값과 비슷한 분포를 나타내었다. 전체적으로 2층 이상의 클래드 층에서는 모재 성분의 직접적인 희석이 일어나지 않으므로 1층 보다 경도 값이 증가하였지만, 고온의 클래드 층 표면에 적층이 이루어져 용고속도가 상대적으로 감소하면서 그 증가폭은 크지 않았다. 또한 일정부분에서 반복적으로 경도가 감소했다가 다시 증가하는 것을 Fig. 4.67의 5층 경도 그래프에서 확인할 수 있었다. 이는 적층 시 기존에 형성된 클래드 층의 재용융 및 재응고가 발생하면서 열영향으로 경도 값이 감소한 것으로 사료된다.

SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ;

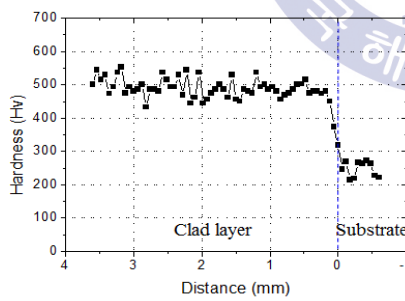
$P$  : 4 kW,  $v$  : 4 mm/s,  $R_f$  : 3 rpm(19~20 g/min),  $G_S$  &  $G_C$  : 20 & 8 l/min(Ar),  $O_{Lap. r}$  : 20 %



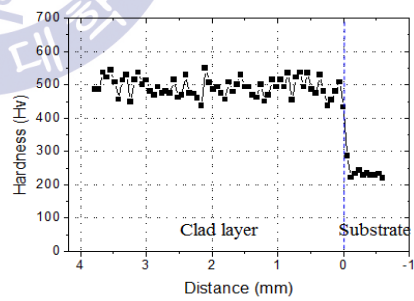
Measuring position : a



b



c

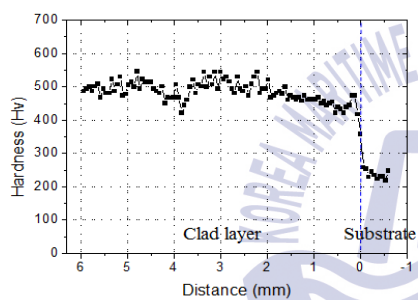
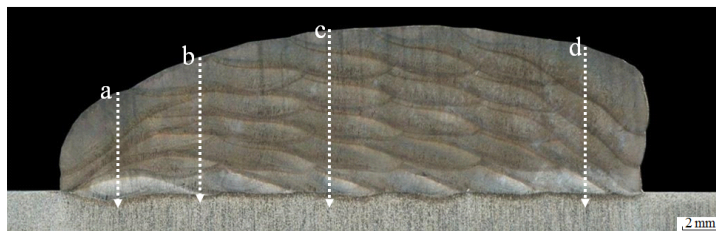


d

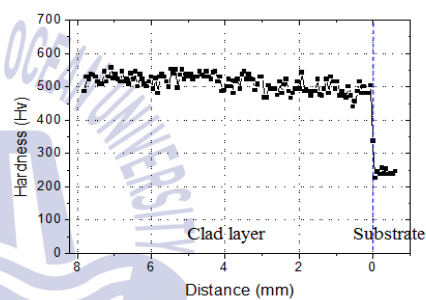
Fig. 4.66 Longitudinal hardness distribution of 2nd layer at 20 % overlapping ratio

SNCrW - Stellite 6, Multi-pass clad ;

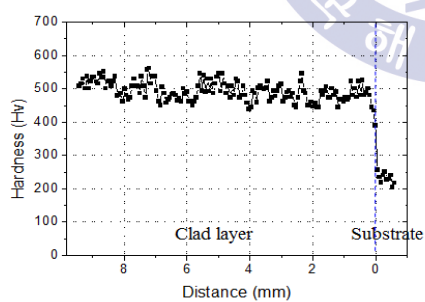
$P$  : 4 kW,  $v$  : 4 mm/s,  $R_f$  : 3 rpm(19~20 g/min),  $G_s$  &  $G_c$  : 20 & 8 l/min(Ar),  $O_{Lap. r}$  : 20 %



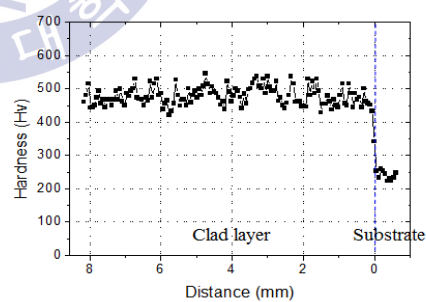
Measuring position : a



b



c



d

Fig. 4.67 Longitudinal hardness distribution of 5th layer at 20 % overlapping ratio

## (2) 횡방향 경도분포

실제 산업현장에서는 클래딩 후, 동일한 높이의 고른 표면을 형성하기 위해 클래드 층 표면 일부를 가공하기 때문에 경도를 1층 멀티 패스 클래드 층의 경우 경계층과 표면사이 거리의 1/3, 2/3 위치에서, 2층 멀티 패스 클래드 층은 표면에서부터 1 mm 떨어진 부분과 경계층과 표면사이 거리의 중간 위치에서 횡방향으로 측정하였다. Fig. 4.68과 Fig. 4.69는 4 kW, 4 mm/s, 19~20 g/min의 조건에서 중첩률 10 %와 20 %의 멀티 패스 클래드 층의 측정 위치와 경도 분포를 나타낸다. 중첩률 10 %일 경우 a와 b 라인의 평균 경도는 484 Hv, 490 Hv로 거의 비슷하며 a 그래프에서 경도의 증감이 반복되는 것을 확인할 수 있다. 중첩률 20 %일 때는 a' 라인의 평균 경도 505 Hv, b' 라인은 490 Hv로 중첩률 10 %보다 평균 경도가 상승하였으며 a' 그래프에서 경도 증감의 반복 또한 확인할 수 있다. 경도 증감이 발생하는 이유는 클래드 층 중첩시 기존에 형성된 클래드 층이 재가열-재용융이 이루어지면서 조직이 조대화되었기 때문이라고 사료된다<sup>45)</sup>. 두 조건 모두 b, b' 그래프에서는 a, a' 그래프보다 경도 분포가 균일하게 나타났다. 일반적으로 경도의 증감을 반복하게 되면 경도가 낮은 위치에서 부분 마모가 발생하기 쉬우므로 고저 값의 차이를 최소화할 필요가 있다. 하지만 중첩률 10 %와 20 %의 경도 분포가 전체적으로 분말 특성의 경도 이상의 값을 가지므로 두 가지 조건 모두 적절한 조건으로 판단된다.

Fig. 4.70과 Fig. 4.71은 전과 동일한 조건으로 2층까지 쌓아올려 형성한 클래드 층의 경도 측정위치와 경도 분포를 나타낸다. 표면에서 1 mm 떨어진 위치인 a, a'는 2층 클래드 층 영역이며 중첩률 10 %와 20 %에서 평균 경도는 523 Hv, 518 Hv로 거의 유사하게 측정되었다. 이와 달리 1층으로만 이루어진 클래드 층에서는 중첩률 10 %보다 20 %에서 상부 평균 경도 값이 약 20 Hv정도 더 높게 측정되는 것을 Fig. 4.68과 Fig. 4.69에서 확인할 수 있다. 또한 중첩부에 경도 증감이 두드러지게 나타났으며 Fig. 4.70과 Fig. 4.71의 a, a' 그래프에서도 중첩되면서 열 영향으로 경도 값이 감소하였으나 감소 정도가 줄어든 것을 알 수 있다. 1층 멀티 패스 클래드 층을 형성할 때보다 온도가 높은 1층 클래드 층 표면 위에 2층 멀티 패스 클래드 층을 쌓을 때, 열 축적으로 인하여 클래드 층간의 온도 차이가 감소해 중첩부의 경도 감소폭이 줄어든 것으로 사료된다. 경계층과 표면사이

거리의 중간 위치인 b, b'는 1층과 2층 사이의 경계부 부근으로 2가지 중첩률 조건 모두 511 Hv, 515 Hv로 비슷한 평균 경도를 나타냈다. 모재 성분의 희석이 직접적으로 발생하지 않기 때문에 전체적으로 1층 멀티 패스 클래드 층보다 평균 경도 값이 상승하였으며, 보다 고른 경도 분포를 확인할 수 있었다.

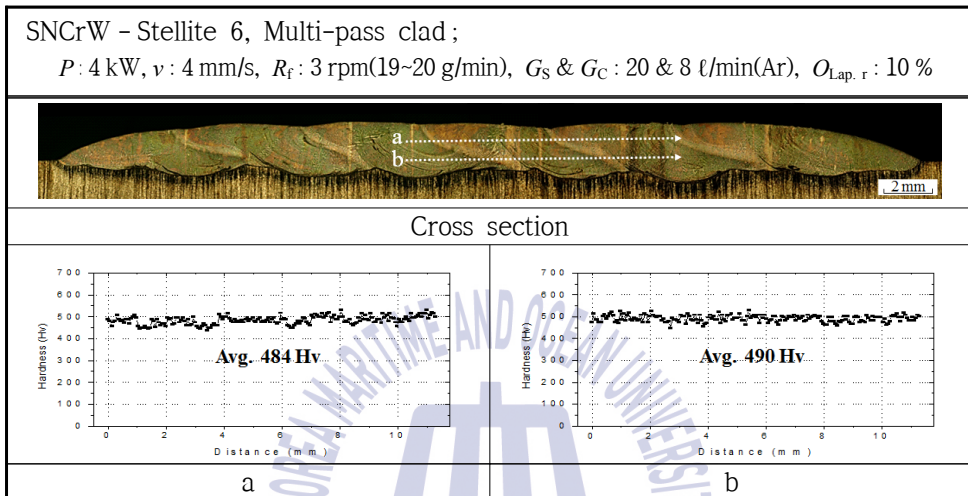


Fig. 4.68 Transverse hardness distribution of 1st layer at 10 % overlapping ratio

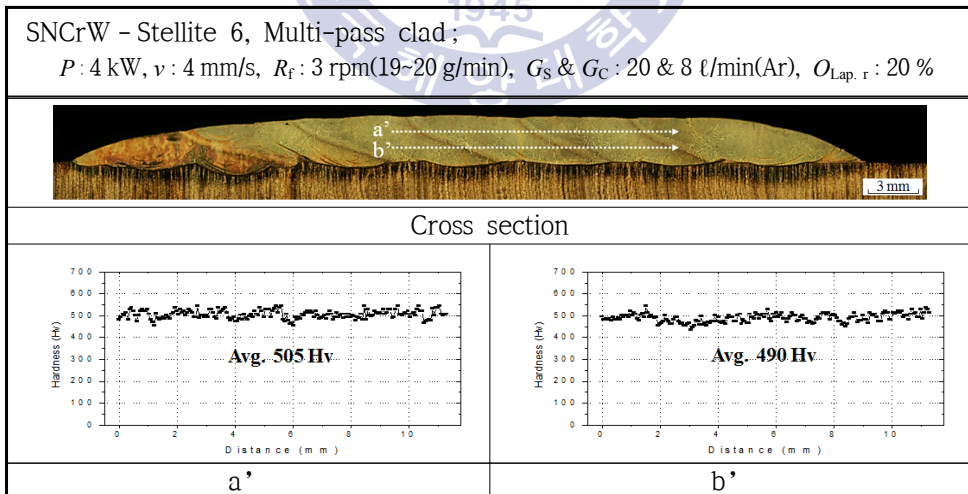


Fig. 4.69 Transverse hardness distribution of 1st layer at 20 % overlapping ratio

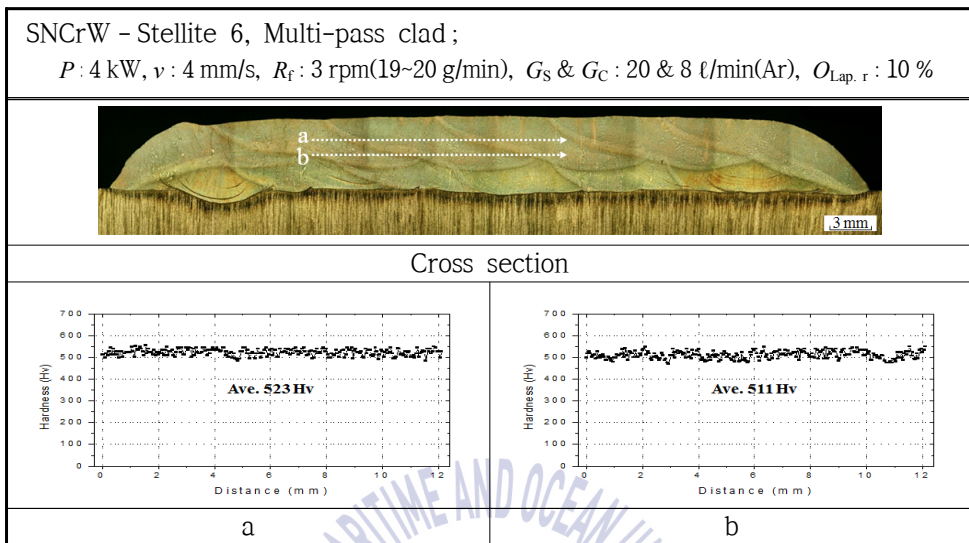


Fig. 4.70 Transverse hardness distribution of 2nd layer at 10 % overlapping ratio

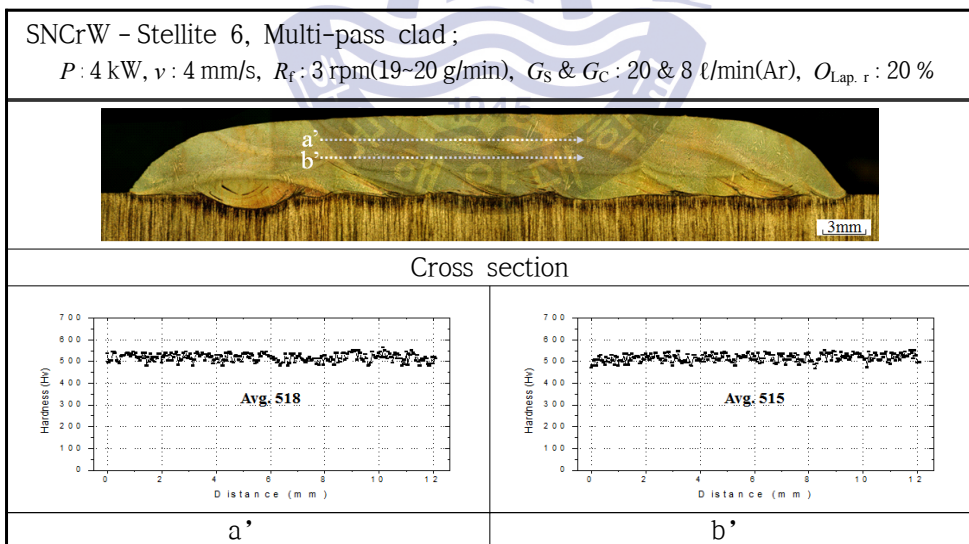


Fig. 4.71 Transverse hardness distribution of 2nd layer at 20 % overlapping ratio



#### 4.3.4 멀티 패스 클래드 층의 미세조직 및 성분분석

##### (1) 클래드 층의 미세조직

레이저 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s, 분말 송급량 19~20 g/min의 조건에서 20% 중첩률로 형성된 1층, 2층 멀티 패스 클래드 층을 광학현미경으로 중첩부 및 적층부 미세조직을 관찰하였으며, 그 대표적인 사진을 Fig. 4.72와 Fig. 4.73에 나타내었다. 중첩 및 적층 후 클래드 층의 단면에서는 기공이나 균열과 같은 결함이 발견되지 않았으며 모재 표면의 일부가 용융되면서 금속학적으로 결합이 이루어진 것 또한 알 수 있었다. 모재와의 경계층에서부터 클래드 층 표면까지 평활계면 응고, 셀형 응고, 셀형 수지상 응고, 등축 수지상 응고가 관찰되었으며, 중첩되는 영역 및 적층되는 영역을 뚜렷이 확인할 수 있었다. Fig. 4.72에서 A는 3번째 중첩부를 중심으로 클래드 층의 상부와 중앙 영역을 포함하며, 이 부분을 100배로 확대하여 A-1, A-2로 나타내었고 200배로 배율을 보다 증가시켜 A-1', A-2'로 나타내었다. B는 경계층 주위 영역으로 B-1, B-2과 B-1', B-2'로 나타내었다. Fig. 4.72의 (a)를 통해 중첩부는 미세한 덴드라이트 구조의 클래드 층이 용융 · 응고되면서 조대해진 주상과 세포상 구조가 나타났으며 이전에 형성된 클래드 층의 일부가 재용융 및 재가열되어 결정입자가 점점 커지는 것을 확인할 수 있으며 새로운 클래드 층에서 다시 작아지는 것을 알 수 있다. 클래딩이 진행될수록 열 축적으로 인해 클래드 층의 온도 구배는 점차 감소하며, 기판을 통한 열 흐름보다는 주위 대기를 통해 방출하게 되므로 복잡한 온도 구배 방향으로 1 패스 클래드 층 보다 더 다양한 결정성장 방향이 나타났으며 특히, 모재 부근 중첩부 영역에서 냉각속도가 느려 더욱 복잡한 결정성장 방향 및 길게 성장하는 덴드라이트 구조를 Fig. 4.72의 (b)에서 확인할 수 있다. 또한 중첩된 클래드 층에서도 조직의 성장 방향이 표면을 향해 나아가는 것을 확인할 수 있다.

클래드 층을 쌓아올릴 때도 중첩할 때와 동일하게 복잡한 결정 방위를 나타내는 것을 Fig. 4.73에서 확인할 수 있다. 중첩부와 적층부의 미세조직은 빠른 응고속도로 인하여 모재와 클래드 층 사이의 미세조직과 달리 평면 응고조직이 존재하지 않았으며 적층 경계부에서도 조대한 주상 및 세포상 구조가 나타났다. 2층 멀티 패스 클래드 층을 표면 온도가 높은 1층에 쌓아올릴 때, 형성되는 클래드 층은

고온에서의 오랜 노출 시간으로 냉각속도가 감소하여 상대적으로 조대한 미세 조직이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 더 많은 층을 쌓아올릴수록 기존의 클래드 층보다 결정립 크기가 더 커진다고 보고되고 있다. 또한 클래드 층을 2층까지 적층 시, 1층 클래드 층의 상부에 존재하였던 등축정 및 방향성을 잃은 덴드라이트가 용융되어 나타나지 않았으나 2층 상부에서 다시 나타나는 것을 확인할 수 있다<sup>45)</sup>.



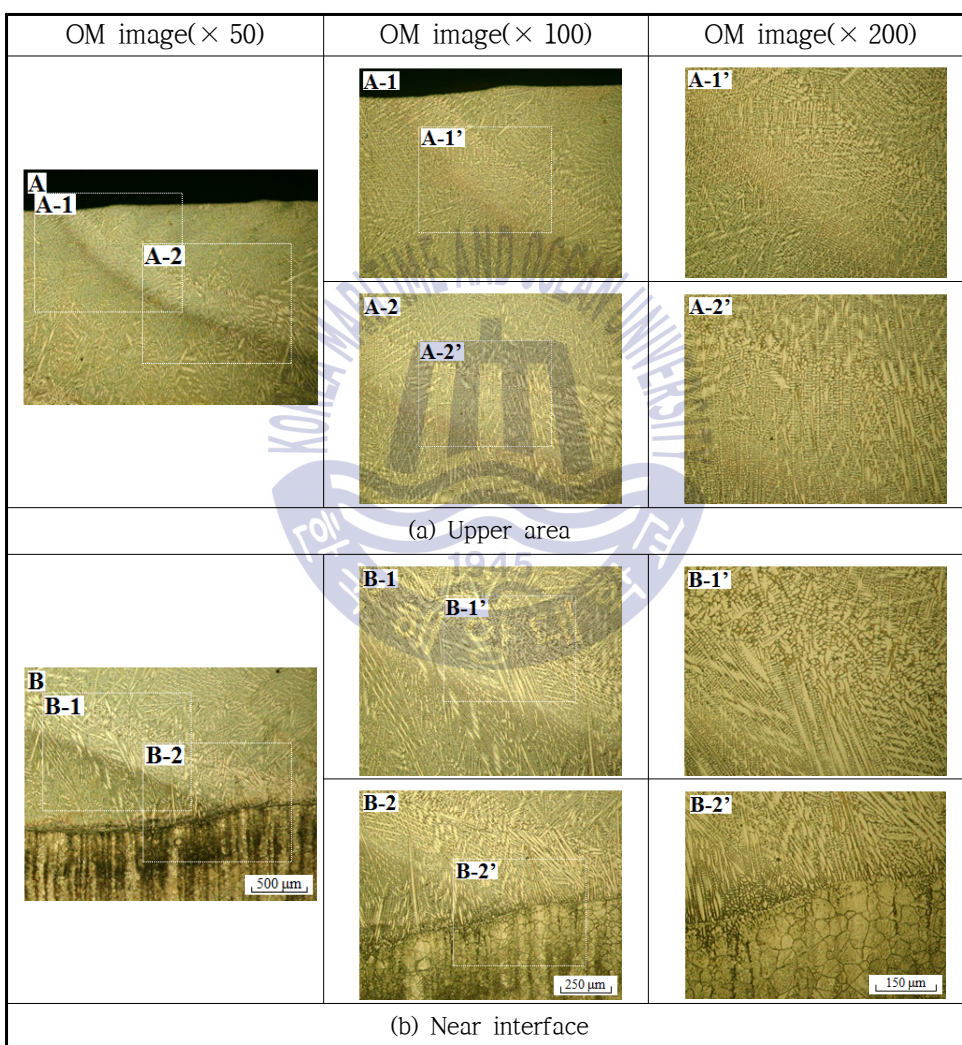
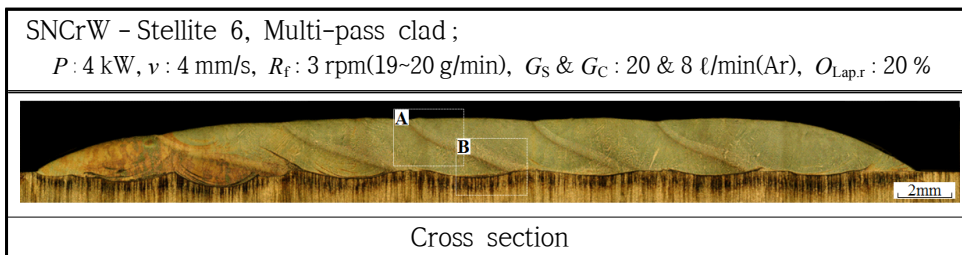
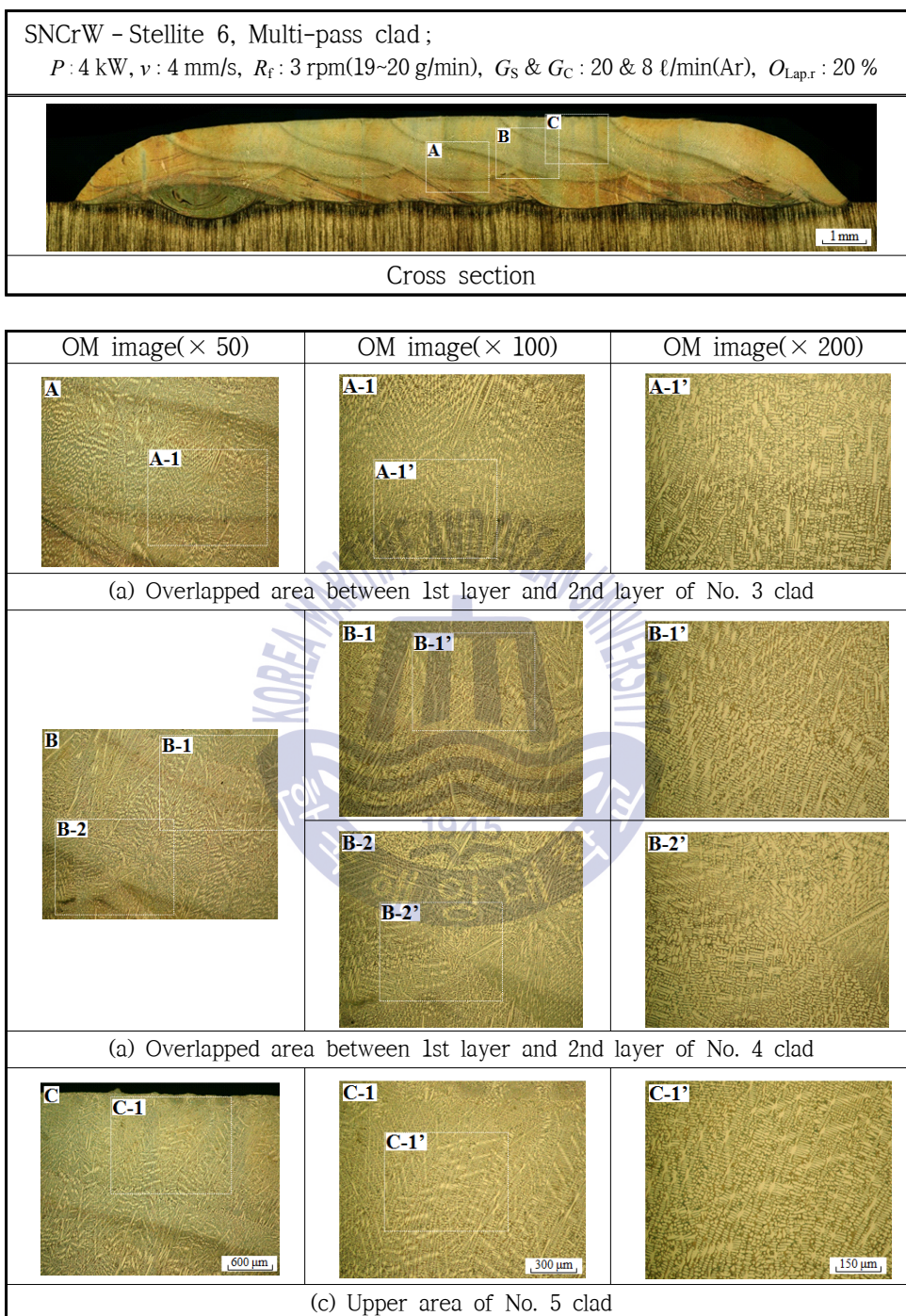


Fig. 4.72 Cross section and microstructure in multi-pass clad layer





**Fig. 4.73** Cross section and microstructure in 2nd layer & multi-pass clad layer

## (2) 클래드 층의 성분분석

이미 4.2.1항에 나타난 Fig. 4.30은 중첩률 20 %로 얻어진 멀티 패스 클래드 층의 첫 번째, 두 번째, 세 번째 및 마지막 클래드 층을 깊이 방향으로 EDS 성분 분석 결과이다. 첫 번째 클래드 층 영역인 a 그래프에서는 Fe이 약 20 % 정도 측정되었으며 그와 달리 b의 상부와 c, d 영역은 첫 번째 클래드 층이 속하지 않는 위치로 Fe 성분이 약 10 % 미만으로 감소하여 나타났다. 중첩 진행 시 모재로 공급되는 빔 에너지양의 차이로 인해 첫 번째 클래드 층을 제외한 나머지 클래드 층에서 회석이 감소한 것을 알 수 있다. 이러한 클래드 층을 2층과 5층으로 쌓아올릴 때 클래드 층과 층 사이 겹치는 영역에서 재용융 및 재응고로 인한 정도 감소가 발생했으며 성분 분포의 차이를 확인하고자 EDS 라인 분석을 실시하였다.

Fig. 4.74는 2층 멀티 패스 클래드 층의 첫 번째, 두 번째, 세 번째 및 마지막 클래드 층 위치에서, Fig. 4.75는 5층 멀티 패스 클래드 층의 첫 번째와 두 번째, 세 번째 클래드 층 위치에서 깊이 방향으로 성분 분석 결과를 나타낸다. 두 조건의 성분 분포는 전체적으로 유사한 경향을 나타내었다. Fig. 4.74의 a 그래프는 1층과 2층의 첫 번째 클래드 층 영역으로 1층과 2층 클래드 층 사이 경계부분에서 Fe의 감소와 Co의 증가가 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고 클래드 층의 적층은 기존에 형성된 클래드 층 표면에 새로운 클래드 층을 쌓아올리는 것이므로 모재 성분의 직접적인 회석이 발생하지 않는다. 그 대신 이미 형성된 1층 클래드 층에 존재하던 모재 성분이 2층 클래드 층에 영향을 미치게 되므로 나머지 b와 c, d 영역보다 Co의 양이 보다 작게 측정되었다. b와 c, d 그래프에서도 또한 1층보다 2층에서 Co 양이 약간 더 증가하였으며 그 차이는 상당히 작았다. 클래드 층을 5층까지 쌓아올렸을 때도 또한, 1층의 첫 번째 클래드 층에서 Fe 성분이 약 20 % 가까이 높게 측정되었으나 점차 감소하여 2층에서 5층까지 10 % 미만으로 나타났으며 Co는 1층에서 약 40~50 % 정도 측정되었고 1층과 2층 경계에서 점차 증가하여 2층에서부터는 약 60 % 정도 분포하는 것을 Fig. 4.75의 a 그래프에서 확인할 수 있다. a와 달리 b, c 그래프에서는 층과 층 사이의 뚜렷한 성분 차이가 나타나지 않았다.

멀티 패스 클래드 층의 중첩부 및 적층부의 성분 분포 차이를 좀 더 정확하게

확인하기 위해 레이저 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s, 분말 송급량 19~20 g/min의 조건에서 20 % 중첩률로 얻어진 1층과 2층, 3층 멀티 패스 클래드 층 단면에 대하여 EPMA 분석을 실시하였다. Fig. 4.76과 Fig. 4.77은 1층 멀티 패스 클래드 층에서 첫 번째 클래드 층과 두 번째 클래드 층의 중첩부(a), 세 번째와 네 번째 클래드 층의 중첩부(b), 첫 번째 클래드 층과 모재 사이 경계부(c)와 세 번째 클래드 층과 모재 사이 경계부(d)에 대한 EPMA 매핑(mapping) 실시 결과를 나타낸다. 먼저 Fig. 4.76의 (a)에서 첫 번째 클래드 층과 두 번째 층 사이의 Co와 Fe 성분의 분포를 통해 모재 회석률의 차이를 확인할 수 있었다. 먼저 Co의 경우, 첫 번째 층에서 고르게 분포하였으나 두 번째 층이 중첩되는 부분에서 더 많은 양의 Co가 분포하는 것을 알 수 있다. 반면 모재가 용융되어 클래드 층과 회석이 발생하면서 첫 번째 클래드 층에서 Fe과 Ni의 성분이 두 번째 클래드 층 보다 증가한 것을 알 수 있으며 빠른 냉각속도로 성분 분포가 균일하지 않았다. 두 번째 클래드 층 영역에서도 모재 용융량의 감소로 모재 회석이 상당히 감소하였으며 이 부분에서도 용융금속의 대류현상과 급속 응고로 일부분에서 Fe이 증가하는 것을 알 수 있다. 앞의 EDS 결과를 통해 첫 번째 클래드 층을 제외한 나머지 영역에서는 전체적으로 비슷한 성분 분포를 나타냈으며 모재 회석이 보다 감소하는 것을 알 수 있었다. 따라서 Fig. 4.76의 (b)에서는 Fe 성분 분포의 차이가 나타났으나 그 차이는 상당히 작았기에 전체적으로 중첩부에 관계없이 고른 성분 분포를 확인할 수 있다. 세 번째와 네 번째 클래드 층의 중첩부와 그 주위의 Co 분포 정도는 (a) 영역의 두 번째 클래드 층과 비슷하게 나타났다.

클래드 층과 모재 사이의 우수한 결합력을 위해서는 모재의 용융이 불가피하다. 하지만 레이저 클래딩에서는 모재 용융량을 감소시켜 회석을 최소화하는 것이 특징이므로 1층 멀티 패스 클래드 층에서 경계층을 중심으로 성분 차이를 확인해볼 필요가 있다. 중첩 시 모재 회석이 많이 발생하는 초층과 모재 사이의 경계층 성분 분포를 나타낸 Fig. 4.77의 (c)를 통해서 Co가 클래드 층 내에서 고르게 분포하였으며, 두께 약 38~57  $\mu\text{m}$ 의 경계층에서 급격하게 줄어들었고 모재에서 검출되지 않는 것을 확인하였다. Fe은 클래드 층 전체에 고르게 분포한 것으로 보아 모재 성분의 상당량이 회석된 것을 알 수 있다. 세 번째 클래드 층과 모재 사이 경계층 영역 측정 결과인 (d)와 상당한 차이를 나타내었다. 우선 가장 큰 차



이는 Fe의 분포이다. Fe은 모재와 경계층에서만 주로 분포하였으며, 첫 번째 클래드 층과 달리 클래드 층 내에서 거의 분포하지 않았다. 또한 초층은 클래드 층 전체가 희석되어 경계층을 희석층이라 정의하기 어려웠지만 세 번째 층의 경우 경계부에서만 철의 희석이 발생하여 희석층(dilution layer)이라 명칭할 수 있으며 이 희석층의 두께는 약 110~185  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

Fig. 4.76과 Fig. 4.77을 통해 1층 멀티 패스 클래드 층의 중첩부와 경계부에서 성분 분포의 차이를 확인할 수 있었으며, 동일한 조건의 클래드 층을 2층까지 쌓아올릴 때 1층과 2층 사이 영역의 성분 변화 또한 파악할 필요가 있었다. 따라서 Fig. 4.78은 세 번째 클래드 층과 네 번째 클래드 층 사이 적층되는 부분(a)과 네 번째 클래드 층과 다섯 번째 클래드 층 사이 적층되는 부분(b)의 EPMA 분석 결과를 나타낸다. Fig. 4.78의 (a)와 (b)에서 전체적으로 Co와 Fe, Ni의 성분 차이가 나타났으며, Level 게이지를 통해 그 차이가 크지 않다는 것 또한 알 수 있었다. 1층 클래드 층 표면이 다시 용융되면서 2층 클래드 층이 형성되므로 모재 성분이 보다 적게 측정되었으며 1층과 2층 적층부에서 성분이 점차적으로 변화하였다. 결과적으로 1층 멀티 패스 클래드 층에서 모재 희석이 일부 발생했을지라도 2층에서 모재 성분이 감소하여 클래딩 분말의 특성을 잘 나타낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

5층 멀티 패스 클래드 층의 EDS 라인 분석을 나타낸 Fig. 4.75에서 첫 번째 클래드 층 영역을 제외한 나머지 측정 부위에서 1층에서 5층까지 전체적으로 거의 유사한 Co와 Fe의 분포를 나타내었다. 하지만 2층 멀티 패스 클래드 층의 적층부 EPMA 분석을 통해 1층과 2층 사이에 성분 차이를 확인할 수 있었기에, 2층에서 한 층 더 쌓아올려 형성한 3층 멀티 패스 층의 세 번째 클래드 층의 끝과 네 번째 클래드 층이 겹치는 위치에서 3층과 2층 사이(a)와 2층과 1층 사이(b), 1층과 모재 사이(c)를 EPMA 분석하였으며 그 결과를 Fig. 4.79와 Fig. 4.80에 나타내었다. Fig. 4.79의 (a)에서 나타내듯이 전체적으로 성분이 고르게 분포하였으며 3층과 2층 사이 적층부에서 Fe의 양이 변화한 것을 알 수 있지만 그 변화는 상당히 작았으며 Co의 분포에서는 거의 차이가 나타나지 않았다. (a)와 달리 (b)에서는 Fig. 4.78과 유사한 분포로 2층에서 Co가 증가하고, Fe과 Ni이 감소였지만 그 차이는 크지 않았다. 그리고 클래드 층을 2층까지 적층했을 경우와 3층까지

적층했을 때의 2층과 1층 적층부의 Fe 함량을 비교했을 때 그 차이는 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 이는 클래드 층의 적층은 기존에 형성된 클래드 층 표면 일부가 다시 용융되면서 응고하여 새로운 층과 접합하게 되는 것이므로 성분 변화가 발생하지 않는 것으로 사료된다. 1층과 모재 사이를 EPMA 분석한 (c)에서는 모재 표면에 경계층이 형성되었다. 경계층의 두께는  $68\sim150\mu\text{m}$ 이며 이 부분을 기준으로 성분이 급격하게 증감하는 것을 알 수 있다. 클래드 층에서도 모재 회석에 영향을 받은 부분은 두 번째 및 세 번째 클래드 층의 성분 분포와는 약간 차이가 발생하지만 회석층을 제외한 나머지 영역에서는 level 게이지를 통해 비슷한 분포를 확인할 수 있다. 그리고 성분분포에서 빠른 냉각속도로 인해 용융금속의 대류 진행 도중 응고하여 대류 방향이 남아있으며 이 부분에서 성분차이가 발생하였다. 그리고 Fig. 4.77의 (d)와 Fig. 4.80의 (c)를 비교했을 때, 클래드 층의 적층 수와 관계없이 모재와 1층 클래드 층 사이 경계 부에서 유사한 성분 분포를 얻을 수 있었다.



SNCrW - Stellite 6, 2nd layer & multi-pass clad ;

$P$  : 4 kW,  $v$  : 4 mm/s,  $R_f$  : 3 rpm (19~20 g/min),  $G_S$  &  $G_C$  : 20 & 8 l/min(Ar),  $O_{Lap.r}$  : 20 %



Cross section

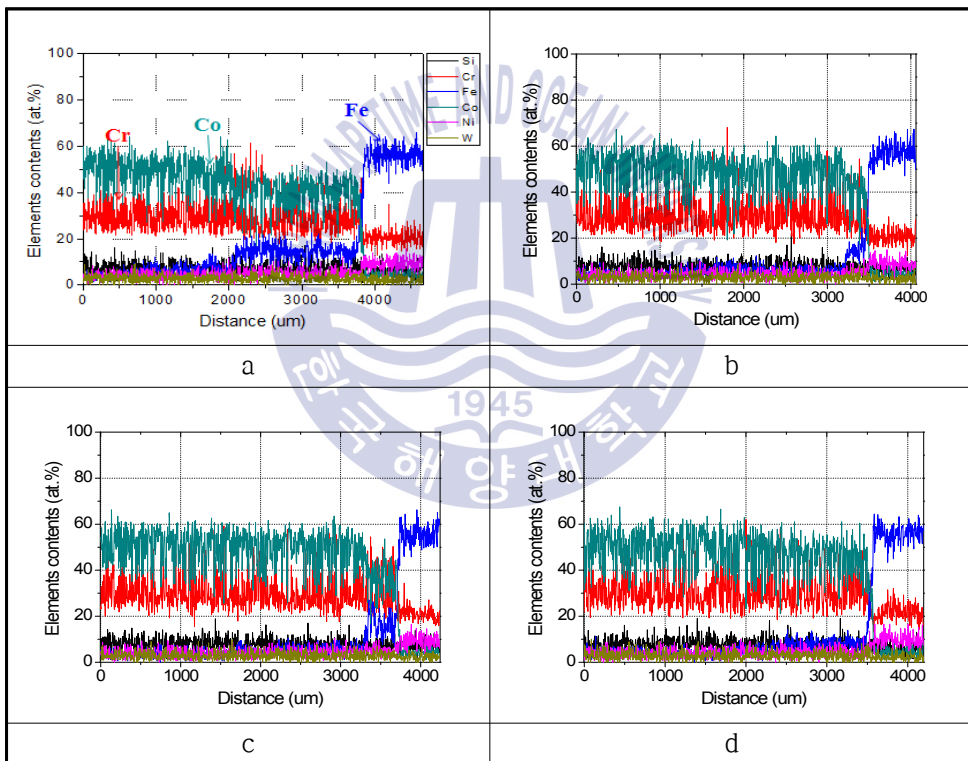
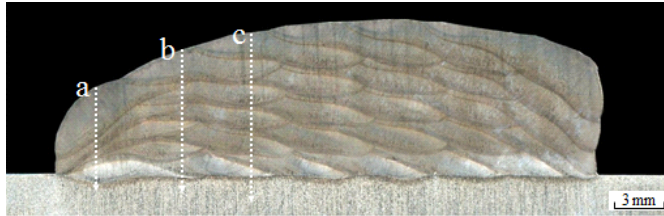


Fig. 4.74 Results of EDS lining analysis along the cross section of 2nd layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio

SNCrW - Stellite 6, 5th layer & multi-pass clad ;

$P$  : 4 kW,  $v$  : 4 mm/s,  $R_f$  : 3 rpm(19~20 g/min),  $G_S$  &  $G_C$  : 20 & 8 l/min(Ar),  $O_{Lap,r}$  : 20 %



Cross section

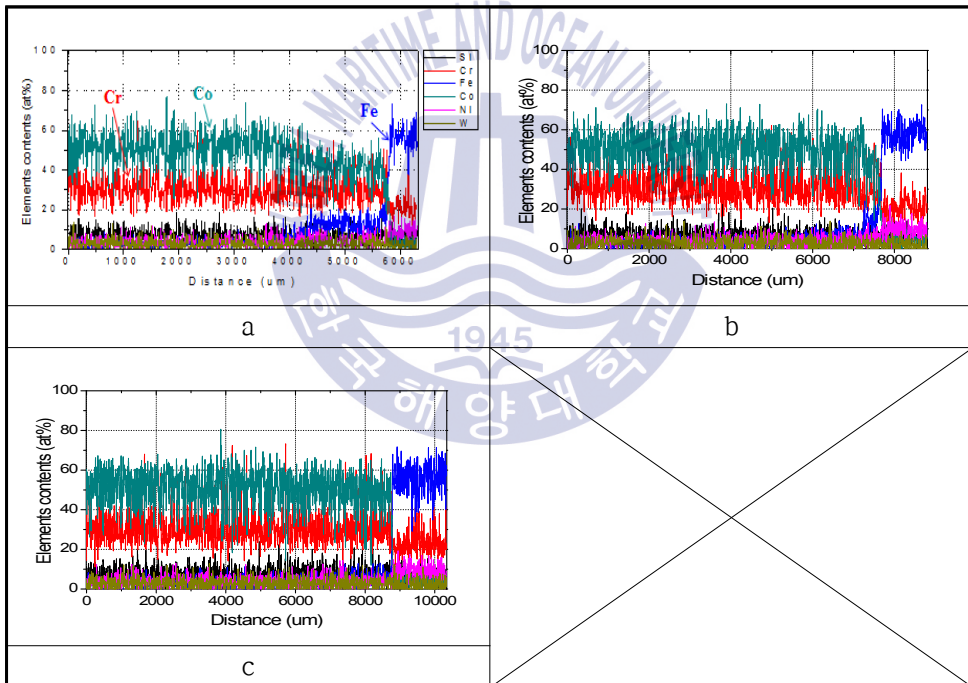
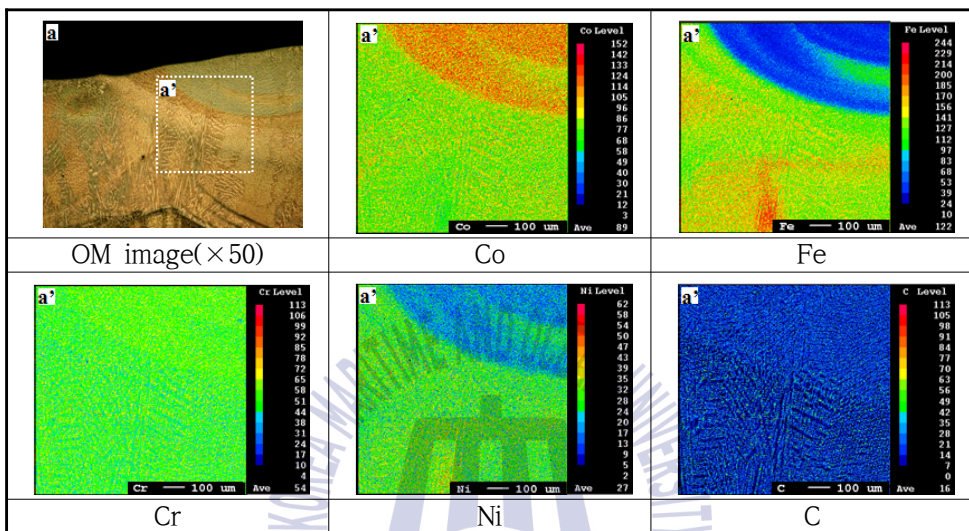
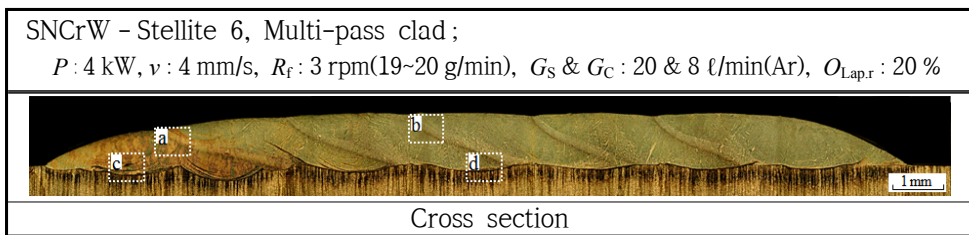
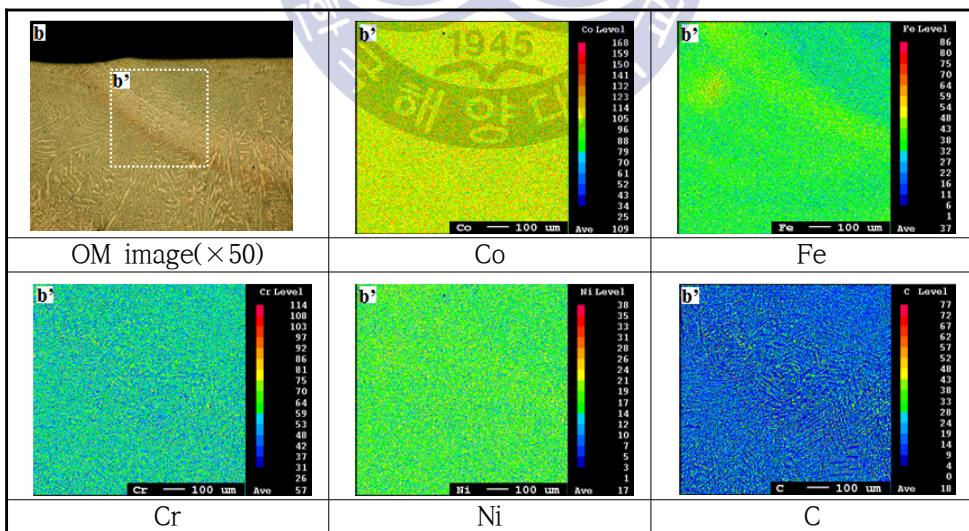


Fig. 4.75 Results of EDS lining analysis along the cross-section of 5th layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio



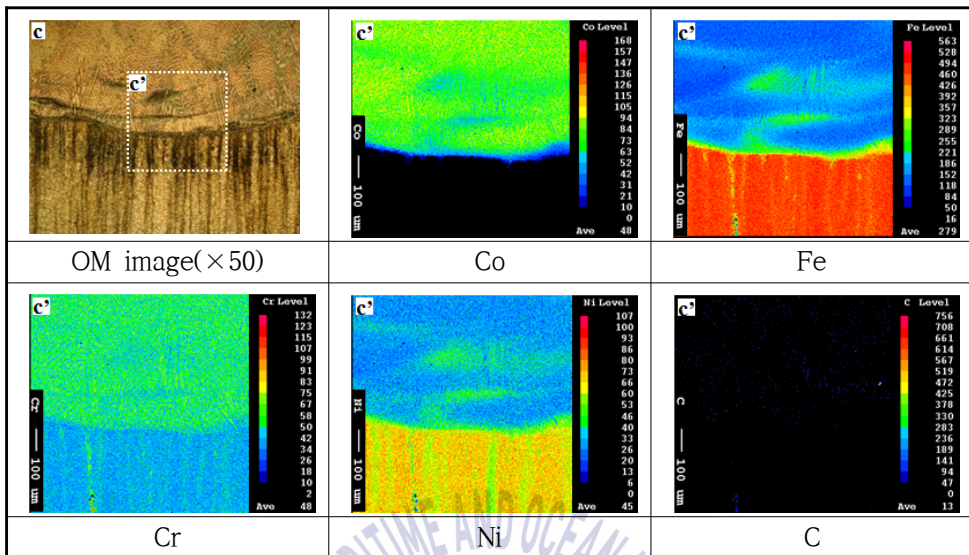


(a) Overlapped area between 1st clad and 2nd clad

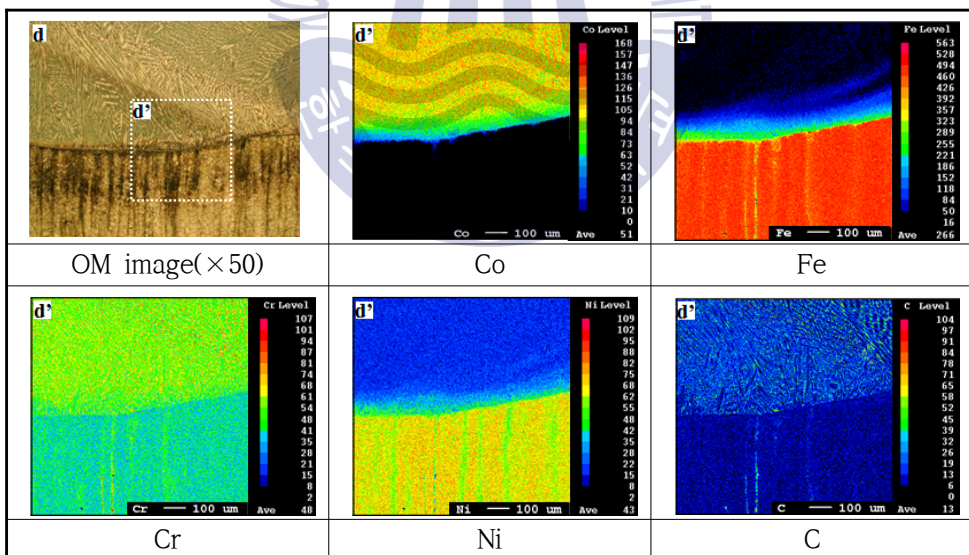


(b) Overlapped area between 3rd clad and 4th clad

**Fig. 4.76** Results of EPMA on cross section of multi-pass clad at 20 % overlapping ratio



(c) Interface area between 1st clad and substrate

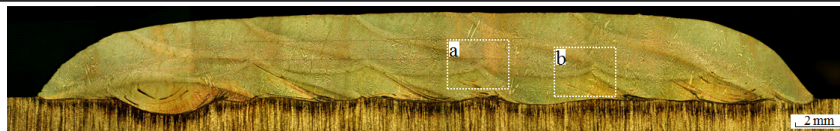


(d) Interface area between 3rd clad and substrate

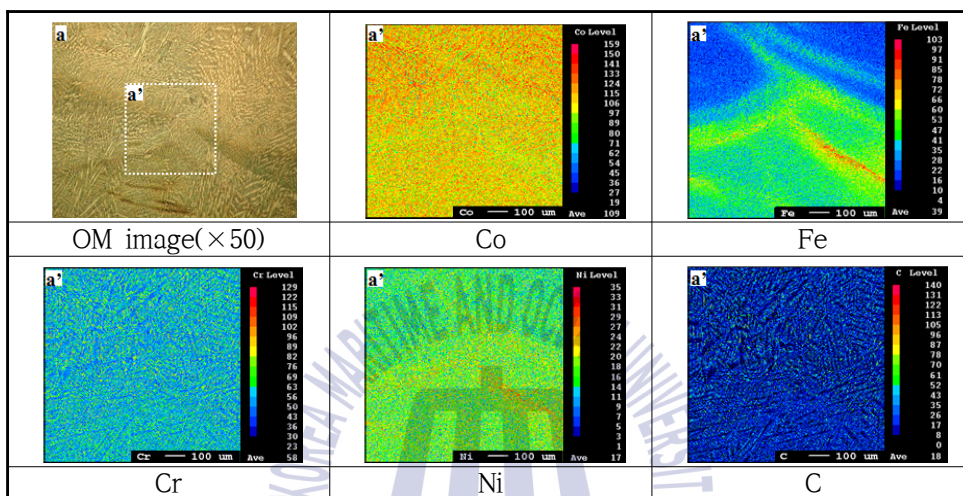
Fig. 4.77 To be continued



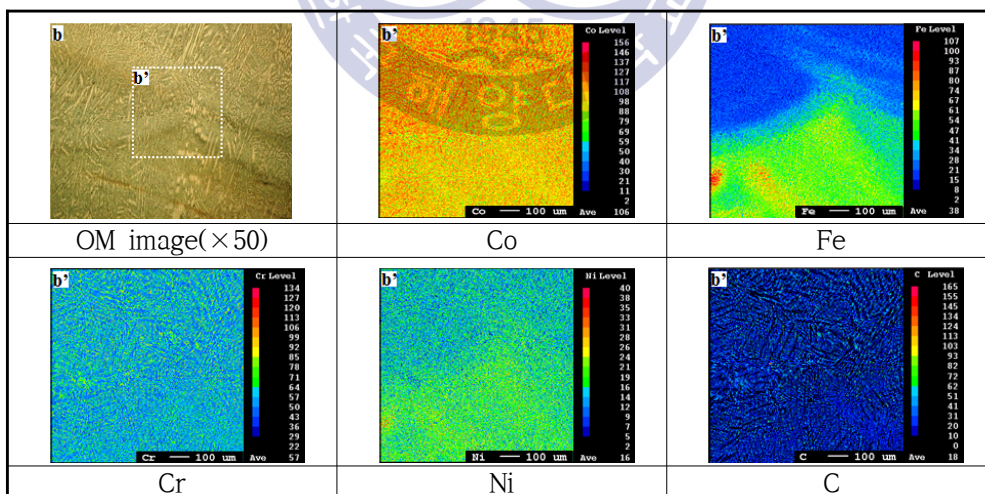
SNCrW – Stellite 6, 2nd layer & multi-pass clad;  
 $P: 4 \text{ kW}$ ,  $v: 4 \text{ mm/s}$ ,  $R_f: 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min),  $G_S \text{ \& } G_C: 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ ,  $O_{Lap,r}: 20 \%$



Cross section

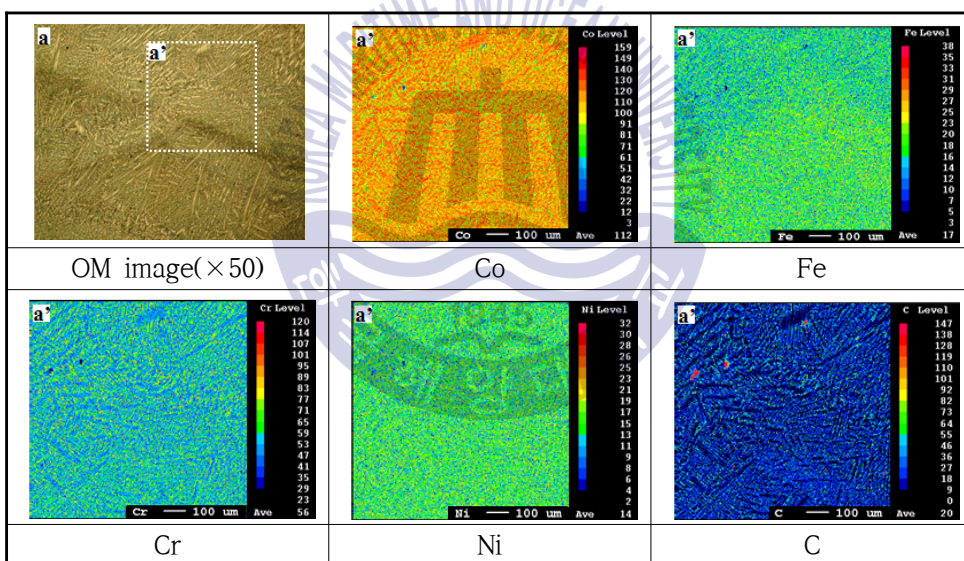
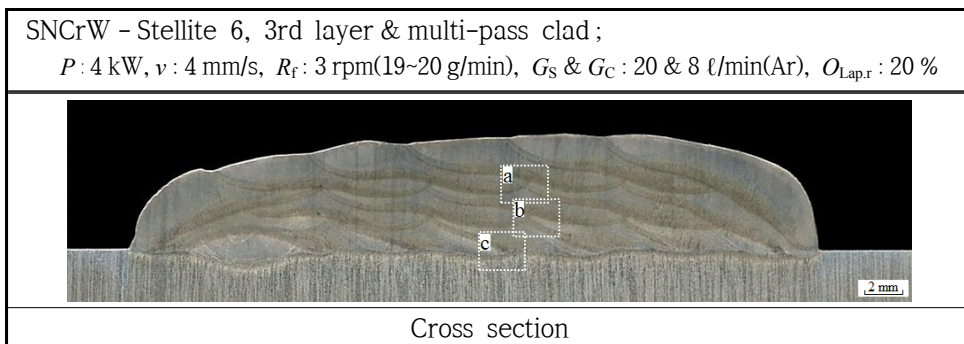


(a) Overlapped area between 2nd layer and 1st layer at the end of 3rd clad



(b) Overlapped area between 2nd layer and 1st layer at the end of 4th clad

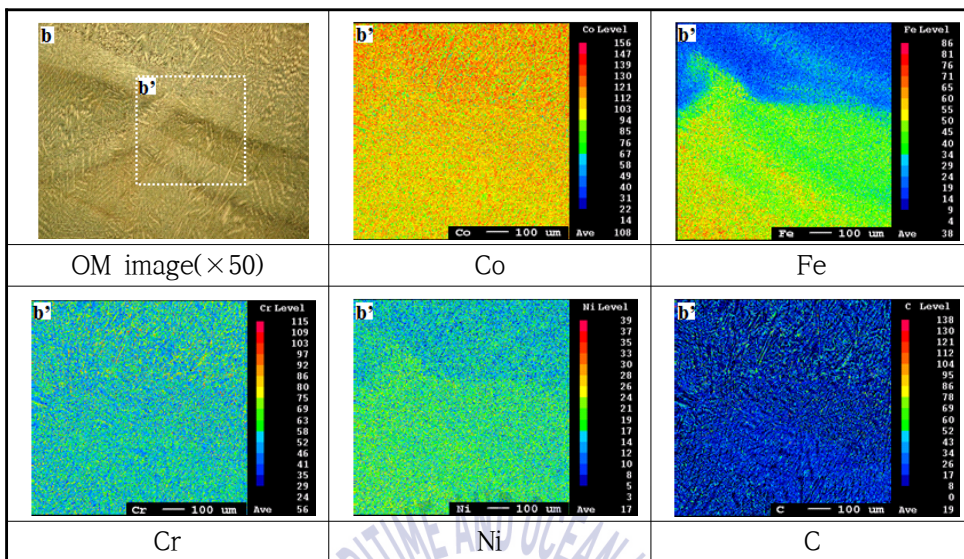
**Fig. 4.78** Results of EPMA on cross section of 2nd layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio



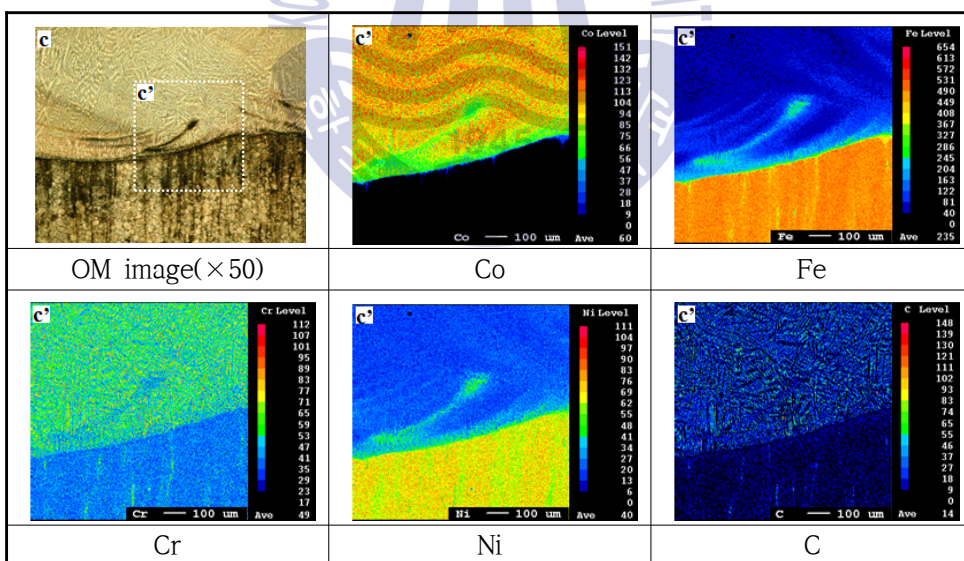
(a) Overlapped area between 3rd layer and 2nd layer

**Fig. 4.79** Results of EPMA on cross section of 3rd layer & multi-pass clad at 20 % overlapping ratio





(b) Overlapped area between 2nd layer and 1st layer



(c) Overlapped area between 1st layer and substrate

Fig. 4.80 To be continued

## 4.4 분말 종류에 따른 코팅 층의 특성 비교

Stellite 6 분말을 이용하여 1패스 및 멀티 패스 클래딩을 실시하였으며, 공정 변수에 따른 클래드 층의 특성을 비교하였다. 하지만 동일한 Co계 합금일지라도 사용목적 및 요구되는 특성에 따라 종류가 다르며, 클래딩 재료에 포함된 합금 원소에 의해 클래드 층의 특성이 달라질 수 있다. 따라서 본 절에서는 W 및 C 성분비를 더 증가시킨 Co계 합금 LC-190을 이용하여 분말 종류에 따른 코팅 층의 특성을 비교하였다.

### 4.4.1 LC-190 클래드 층의 공정변수에 따른 단면형상 및 경도분포

#### (1) 단면형상

레이저 클래딩 시 입열량을 결정하는 주요 변수로는 레이저 출력, 빔 이송속도 및 분말 공급량이 있으며 앞서 진행한 stellite 6 실험에서 적용한 공정변수를 기준으로, 빔 이송속도와 분말 공급량을 4 mm/s, 19~20 g/min으로 고정하고 레이저 출력을 변화시키면서 1패스 클래딩을 실시하였다. Fig. 4.81~Fig. 4.82에 2.0~5.0 kW 까지 출력 변화에 따른 클래드 층 표면 및 횡단면, 클래드 층 폭 및 높이와 희석률 변화 그래프를 나타내었다. 레이저 출력 1 kW의 경우 stellite 6 클래드 층을 형성 하기에 입열량이 충분하지 않으므로 LC-190 클래딩에서도 적용하지 않았다. 출력이 증가할수록 클래드 층의 폭이 넓어지고 높이가 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 폭과 높이 그래프를 통해 2~4 kW 클래드 층의 높이는 거의 유사하나 폭이 두드러지게 증가하는 것을 알 수 있다. 반면 5 kW로 출력을 증가시킬 때 높이가 상승하였으며 폭이 약간 증가하는 것을 확인할 수 있다. 희석률의 경우에는 2~4 kW까지 약간씩 증가하였으나 5kW에서 급격하게 증가하였다. Stellite 6 코팅 층과 달리 2~4 kW 조건의 LC-190 클래드 층의 표면에서 균열이 발생하였다. 균열은 일반적으로 공정 시 코팅 층 내부에 생성된 잔류응력이 적층물질의 응력 허용 범위를 초과하게 될 경우 발생하게 된다. 잔류응력은 크게 수축응력(contraction stress)과 열응력(thermal stress)으로 분류할 수 있다. 레이저 클래딩 동안 빠른 가열과 응고속도에 의해 급격한 온도 변화와 응력이 발생하여, 공정 동안의 응력 변화를 Fig. 4.83에 나타낸다. 수축응력은 용융풀이 응고하면서 발생

하는 수축에 의한 응력이다. 레이저로 파우더와 모재를 용융시키면 열팽창이 발생하고 이때 주변에 의해 제약을 받게 됨으로써 B-B 구간에 압축 응력이 발생하며, 레이저 조사가 끝나면 용융풀은 급속 응고로 C-C 구간에 수축에 의한 인장 응력이 발생하고, D-D 구간은 응고과정은 끝났지만 잔류 인장 응력이 남은 것을 알 수 있다. 따라서 수축응력은 클래딩 분말의 상 변태에 의한 부피변화로 발생한 응력과 응고과정 중 물질의 미세조직 변화에 의한 응력, 그리고 액상의 물질이 고상으로 응고하면서 수축에 의해 발생하는 응력의 합이라고 할 수 있다. 또한 분말과 모재의 용융점 및 열팽창계수가 다르기 때문에 레이저 클래딩 시 위치에 따른 온도구배로 열응력이 발생하게 된다. 모재와 분말 간의 열팽창계수 차이는 모재의 응고 수축을 방해하여 클래드 층에 더 높은 잔류응력을 발생시키고 따라서 균열 발생 가능성은 더욱 증가한다. 클래드 층 내에 균열이 발생하게 되면 기계적 특성이 저하되고 균열을 통해 내부에 수분, 산 등이 침투하게 되어 모재의 부식을 일으킬 수 있다<sup>46-47)</sup>. 5 kW 조건은 높은 입열량으로 냉각속도를 감소시킬 수 있었기에 균열이 발생하지 않았지만 출력이 높으면 균열은 방지할 수 있으나 희석률이 증가하기 때문에 적절하지 않은 조건으로 사료된다.

모재 예열과 클래딩 후 열처리는 균열을 방지하는데 가장 효과적인 수단중의 하나이다. 모재 예열을 실시하면 냉각속도를 느리게 하고 발생하는 응력을 감소시키며 클래딩 후 열처리는 클래드 층 내 잔류응력이 완화되므로 결과적으로 균열 감수성이 낮아지게 된다<sup>48)</sup>. 본 연구에서는 모재 예열을 실시하였으며 예열 온도에 따른 결함 발생 및 클래드 층의 특성 차이를 비교하였다. 예열하지 않았을 때 균열이 발생한 4 kW로 출력을 고정하고 150~400 °C의 범위에서 예열을 실시하였으며 Fig. 4.84~Fig. 4.85에 그 결과를 나타낸다. 모재 예열 후 클래딩을 진행한 결과, 모든 온도 범위 조건에서 결함이 발생하지 않았다. 모재를 예열하지 않았을 때와 예열했을 때 형성되는 클래드 층의 높이는 약 1.3 mm로 거의 동일하였으나 150 °C부터 예열온도가 증가할수록 폭이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 예열을 하면 모재의 온도가 증가하게 되어 빔 흡수율이 좋아지기 때문에 희석률이 약 10 % 이상 증가하는 것을 알 수 있다. 모재를 150~400 °C로 예열 후 클래딩 시, 얻어진 클래드 층의 형상 및 희석률은 거의 비슷하였기에 적정 예열온도 조건을 300 °C로 설정하였다.

균열을 방지하기 위하여 모재를 300 ℃로 예열 후, 전과 동일한 조건에서 레이저 출력을 변화시켜 클래딩을 진행하였다. 출력을 2.0~5.0 kW까지 1.0 kW 단위로 증가시켰을 때의 클래드 층 외관과 단면, 클래드 층 폭 및 높이, 희석률 변화 그래프를 Fig. 4.86~Fig. 4.87에 나타내었다. 모든 출력 조건에서 표면에 균열이 발생하지 않았으며 예열하지 않고 출력을 증가시켰을 때와 비슷한 경향을 나타내었다. 즉, 전체적으로 출력이 상승할수록 폭이 증가하였으나 2~4 kW까지 출력이 증가할 때 클래드 층 폭의 증가가 뚜렷이 나타났지만 5 kW에서 증가폭이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 공급되는 빔 에너지가 많아질수록 용융되는 분말량 또한 증가하여 클래드 층의 높이는 전체적으로 상승하는 것을 알 수 있다. 희석률은 모재를 예열하지 않았을 때 보다 증가하였다. 2 kW와 3 kW에서 희석률 차이는 거의 없었으나 4 kW에서 증가하였으며 5 kW의 조건에서 훨씬 더 증가하여 모재 쪽으로 움푹하게 들어간 경계층뿐만 아니라 상당한 희석으로 인해 표면의 색상 또한 변화한 것을 알 수 있다.

다음은 LC-190 분말 공급량에 따른 클래드 층의 형상 변화를 조사하기 위해 stellite 6 클래드 층 형성에 적용한 공급한 분말량과 동일한 값을 기준으로, 분말 공급 장치의 판의 회전수를 1.5~4.5 rpm까지 1 rpm 간격으로 조절하여 실험을 진행하였다. 2.5 rpm일 때 분말 공급량은 19~20 g/min이었으며, 1 rpm 간격으로 변화할 때 약 8 g/min이 증감하였다. Fig. 4.88~Fig. 4.89에 분말 공급량에 따른 표면 및 단면 사진과 클래드 층의 폭과 높이, 희석률 변화 그래프를 나타낸다. 분말 공급량에 따른 stellite 6 코팅 층의 형상 변화와 거의 동일한 경향을 확인할 수 있다. 공급량이 증가할수록 높이가 증가하였으며 폭은 거의 비슷하였으나 1.5 rpm에서 4.5 rpm으로 증가할 때 약 0.2 mm 감소하였다. 단위 시간 당 공급되는 분말량의 증가는 분말에 흡수되는 에너지의 증가와 모재로 흡수되는 에너지의 증가이므로 희석률은 감소하며 1.5 rpm에서 2.5 rpm로 공급량이 증가할 때 희석률은 급격히 감소하였다.

모재를 300 ℃로 예열 후 1 패스 클래딩 시 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s, 분말 공급량 19~20 g/min 조건에서 균열이 없는 높이 약 1.3 mm, 폭 약 9.5 mm의 클래드 층을 형성할 수 있었다. 이와 같은 조건에서 레이저 빔을 0.6 mm( $O_{Lap,r}$ : 10 %) 및 1.2 mm( $O_{Lap,r}$ : 20 %) 겹치도록 하여 LC-190 클래드 층의 중첩 실험을 진행하였다.



**Fig. 4.90**에 클래드 층의 외관 및 횡단면, 폭과 높이, 희석을 측정값을 나타내었다. 중첩률이 증가할 때, 폭과 희석률은 감소하며 높이는 상승하지만 그 변화폭은 매우 작았다. 그리고 20 % 중첩률 조건에서는 균열이 발생하지 않았으나 10 %에서 클래드 층 표면에 균열이 나타났다. 4번째 클래드 층에서 발생한 균열은 마지막 클래드 층까지 계속 이어졌으며 횡단면과 함께 나타난 균열 광학사진을 통해 클래드 층과 모재의 경계층에서부터 균열이 시작하여 표면으로 전파하며 동시에 표면에서 비드를 가로질러 나아간다는 것을 알 수 있다. 멀티 패스 클래딩 시 중첩부가 용융되면서 소성유동에 의해 발생된 압축 응력은 용융부분이 냉각되면서 인장 응력 상태로 되기 때문에 따라서 이 부분에 응력이 집중되어 균열전파가 일어나기 쉽다. 하지만 클래드 층이 중첩될 때, 이전에 형성된 인접한 클래드 층은 조사되는 레이저에 의해 열처리됨으로써 응력 완화가 발생한다<sup>46,49)</sup>. 따라서 레이저 빔이 1.2 mm 겹치게 되면 보다 더 넓은 면적에 후열처리가 이루어짐으로써 중첩률 20 %에서는 균열이 발생하지 않은 것으로 사료된다.



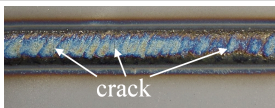
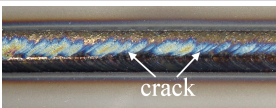
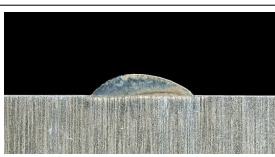
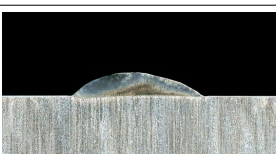
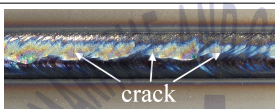
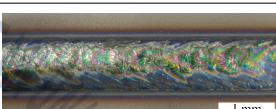
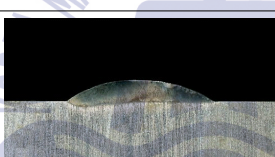

SNCrW – LC 190, One-pass clad ; $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 2.5 \text{ rpm}(19\sim20 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$		
$P \text{ (kW)}$ Clad layer	2 kW	3 kW
Surface		
Cross section		
$P \text{ (kW)}$ Clad layer	4 kW	5 kW
Surface		
Cross section		

Fig. 4.81 Surface and cross section of LC-190 clad with laser power

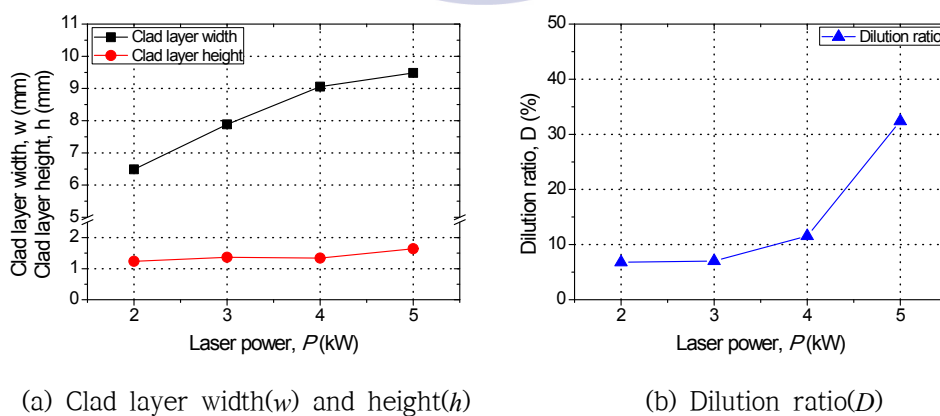


Fig. 4.82 Variation of clad characteristics of Fig. 4.81

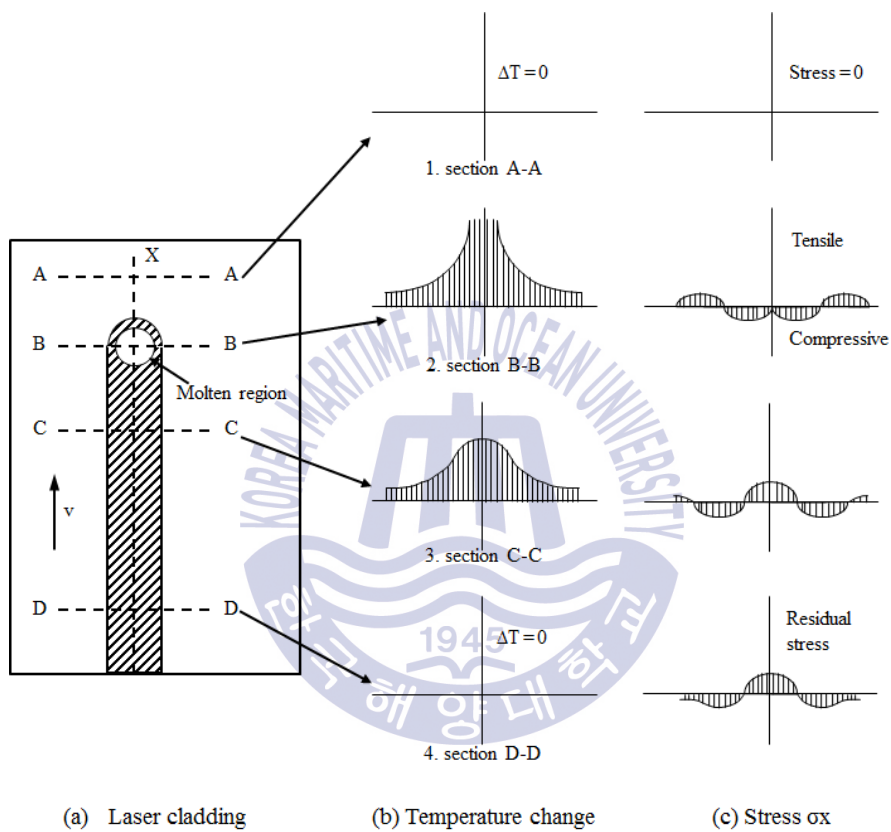


Fig. 4.83 Schematic of changes in temperature and stress during laser cladding

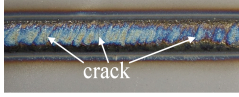
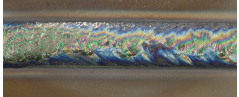




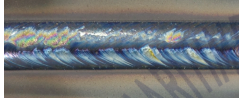

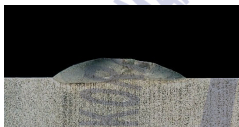

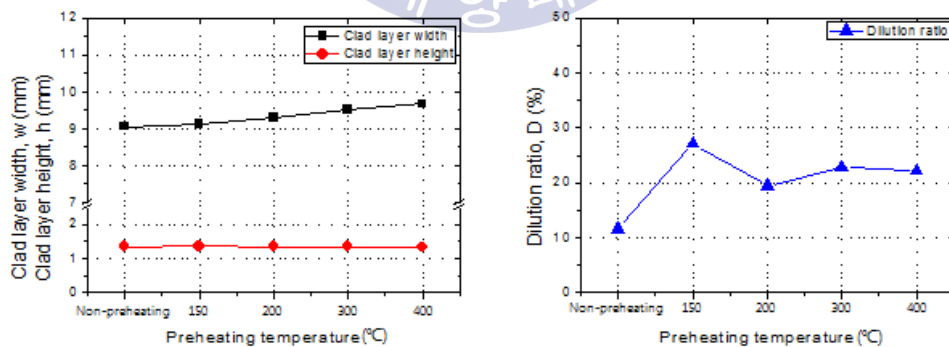
SNCrW - LC 190, One-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 2 \text{ mm/s}$ , $R_f : 3 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_s$ & $G_C : 20$ & $8 \text{ l/min(Ar)}$			
$T_{\text{Preh.}} (^{\circ}\text{C})$ Clad layer	Non-preheating	150 $^{\circ}\text{C}$	200 $^{\circ}\text{C}$
Surface			
Cross section			
$T_{\text{Preh.}} (^{\circ}\text{C})$ Clad layer	300 $^{\circ}\text{C}$	400 $^{\circ}\text{C}$	X
Surface			
Cross section			

Fig. 4.84 Surface and cross section of LC-190 clad with preheating temperature



(a) Clad layer width(w) and height(h)

(b) Dilution ratio(D)

Fig. 4.85 Variation of clad characteristics of Fig. 4.84





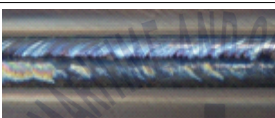
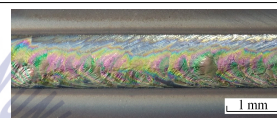


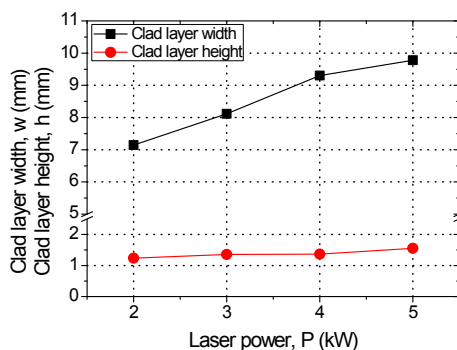
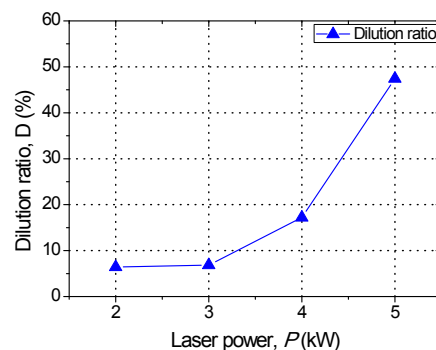
SNCrW - LC 190, One-pass clad ; $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 2.5 \text{ rpm}$ (19~20 g/min), $G_s$ & $G_c : 20$ & $8 \text{ l/min(Ar)}$ , $T_{\text{Preh.}} : 300 \text{ }^\circ\text{C}$		
$P \text{ (kW)}$ Clad layer	2 kW	3 kW
Surface		
Cross section		
$P \text{ (kW)}$ Clad layer	4 kW	5 kW
Surface		
Cross section		

Fig. 4.86 Surface and cross section of LC-190 clad with laser power after preheating substrate to 300 °C



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )



(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.87 Variation of clad characteristics of Fig. 4.86

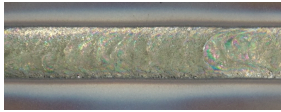
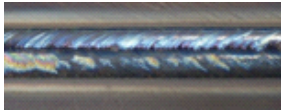


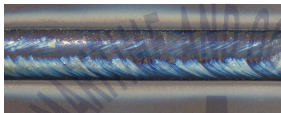
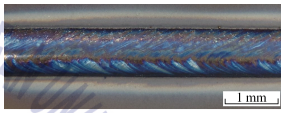


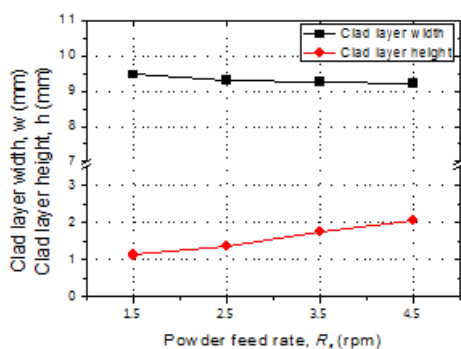
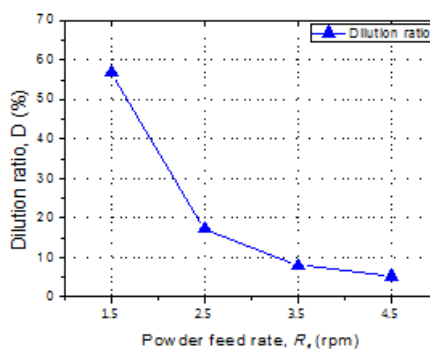
SNCrW - LC 190, One-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $G_S \text{ \& } G_C : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ , $T_{\text{Preh.}} : 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
$R_f$ (rpm) Clad layer	1.5 rpm (11~12 g/min)	2.5 rpm (19~20 g/min)
Surface		
Cross section		
$R_f$ (rpm) Clad layer	3.5 rpm (27~28 g/min)	4.5 rpm (35~36 g/min)
Surface		
Cross section		

Fig. 4.88 Surface and cross section of LC-190 clad with powder feed rate after preheating substrate to  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$



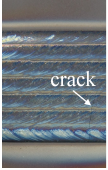



(a) Clad layer width( $w$ ) and height( $h$ )



(b) Dilution ratio( $D$ )

Fig. 4.89 Variation of clad characteristics of Fig. 4.88



SNCrW – LC 190, Multi-pass clad ; $P : 4 \text{ kW}$ , $v : 4 \text{ mm/s}$ , $R_f : 2.5 \text{ rpm}(19\sim 20 \text{ g/min})$ , $G_s \text{ \& } G_c : 20 \text{ \& } 8 \text{ l/min(Ar)}$ , $T_{\text{Preh.}} : 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$		
Photos $O_{\text{Lap.r}} (\%)$	Surface	Cross section
10 % (0.6 mm)		
	Clad layer height( $h$ )	Clad layer height( $w$ )
	1.831 mm	36.454 mm
20 % (1.2 mm)		
	Clad layer height( $h$ )	Clad layer height( $w$ )
	2.0 mm	33.598 mm

**Fig. 4.90** Variation of LC-190 multi-pass clad characteristics at 10 % and 20 % overlapping ratio in laser cladding

## (2) 경도분포

경도는 stellite 6 클래드 층의 측정방식과 동일하게 표면에서부터  $15\mu\text{m}$  떨어진 지점부터 종방향으로  $60\mu\text{m}$  간격을 두어 측정하였다. 동일한 모재를 사용하였으므로, 내열강 SNCrW의 경도는 대략 200~255 Hv이다. Fig. 4.91은 레이저 출력에 따른 회석률 및 경도분포 그래프를 나타낸다. 균열을 방지하기 위해 모재를 300 °C로 예열하였으며 빔 이송속도가 4 mm/s, 분말 공급량이 19~20 g/min 일 때 출력이 증가할수록 회석률은 점차 상승하였으며 5 kW에서 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다. 또한 경도분포에서도 이러한 경향을 확인할 수 있었다. 출력이 낮은 2 kW에서는 빠른 응고 속도와 낮은 회석으로 인해 클래드 층 전체에 경도가 약 700 Hv 이상을 나타내었으며 이는 모재 경도보다 3배 이상 증가한 것을 알 수 있다. 회석률이 약간 상승한 3 kW의 경우, 클래드 층 상부는 약 700 Hv 정도로 측정되었으나 분말 용융액이 충분히 섞이기 전에 빠르게 응고하여 성분 분포의 차이로 중앙에서 약 650~700 Hv로 감소하였다가 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 4 kW에서는 클래드 층 상부 경도가 모재 보다 약 3배 이상 증가하였으나 회석률이 약 10 % 정도 증가하면서 클래드 층 중앙에서부터 경도가 감소하기 시작하였다. 결과적으로 클래드 층 중앙에서부터 경계층까지 모재 성분이 회석된 것을 알 수 있다. 5 kW는 클래드 층 전체가 회석되어 경도분포는 다른 출력 조건에 비하여 약 200 Hv 정도 감소한 약 500~570 Hv 범위로 나타내었다. 경도 그래프에서 경계층을 기준으로 클래드 층과 모재를 구분하였기 때문에 5 kW는 다른 조건에 비하여 과도한 입열량으로 경계층이 모재 내부 깊숙이 위치하여 클래드 층의 경도 분포 길이가 훨씬 더 길어진 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4.92는 분말 공급량에 따른 회석률 및 경도 그래프로, 분말 공급량이 증가할수록 회석률의 감소가 두드러지게 나타났으며 클래드 층의 경도 분포는 상승하였다. 분말 공급량이 11~12 g/min일 때 56 %의 높은 회석률로 인해 클래드 층의 경도가 대폭 감소하여 약 390~470 Hv 정도를 나타내었다. 19~20 g/min 이상으로 분말을 공급했을 때보다 거지반 감소한 것을 알 수 있다. 분말 공급량이 27~28 g/min와 35~36 g/min으로 많을 때, 클래드 층의 경도는 700~800 Hv 범위에 분포하였으며 상대적으로 적은 27~28 g/min일 때 경계층 부근에서 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 분말 공급량이 적을 때 입열량이 높으면 모재 용융량이 늘어

나고 결과적으로 모재 성분의 희석이 증가하며 경계층의 위치 또한 모재 안에 위치하게 된다. 300 °C로 모재 예열 후, 레이저 출력 4 kW, 빔 이송속도 4 mm/s, 분말 공급량 19~20 g/min 및 20 %의 중첩률 조건으로 멀티 패스 클래드 층을 형성하여 경계층과 표면사이 거리의 1/3(a)과 2/3(b) 위치에서 횡방향으로 경도를 측정하였으며 그 결과를 Fig. 4.93에 나타내었다. Fig. 4.93의 (a) 위치에서 평균 경도가 약 714 Hv로 측정되었으며 stellite 6 멀티 패스 클래드 층의 경도분포와 유사하게 중첩부에서 경도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 확인할 수 있었다. (b) 영역의 평균경도는 약 697 Hv로 (a) 위치에서의 평균값과 큰 차이는 나타나지 않았지만 경도 증감의 폭이 증가하였다. 경도가 점차 감소하는 부분은 중첩에 의한 열영향 뿐만 아니라 모재 성분이 희석 되면서 이러한 현상을 나타낸 것으로 사료된다.

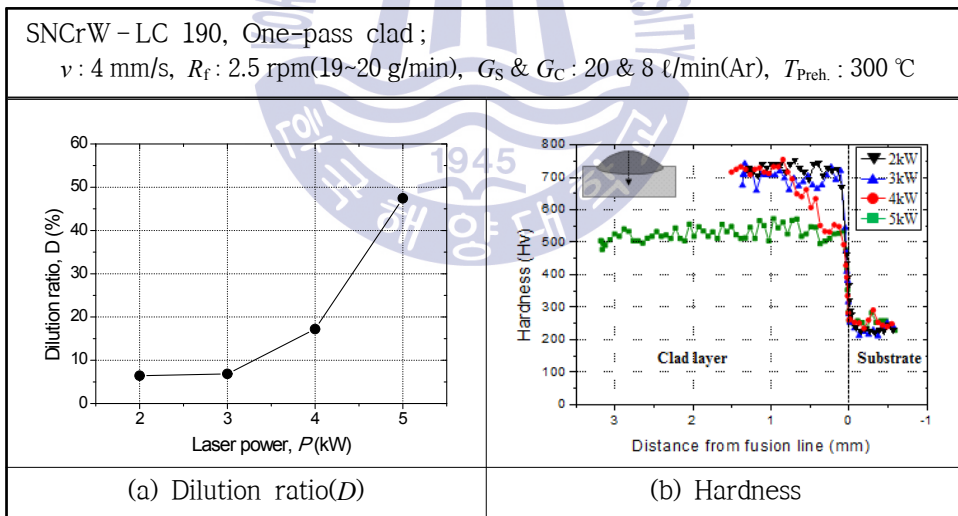


Fig. 4.91 Variation of dilution ratio and hardness with laser power after preheating substrate to 300 °C

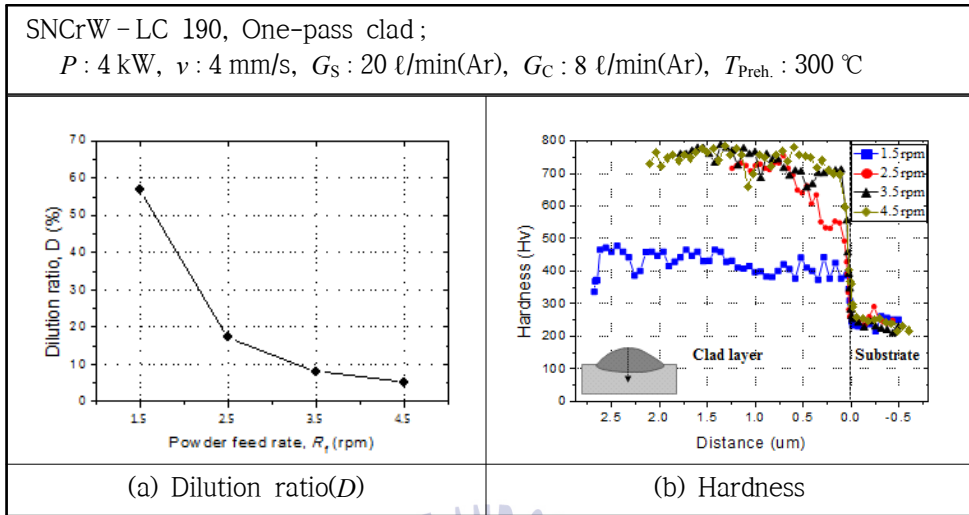


Fig. 4.92 Variation of dilution ratio and hardness with powder feed rate after preheating substrate to  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$

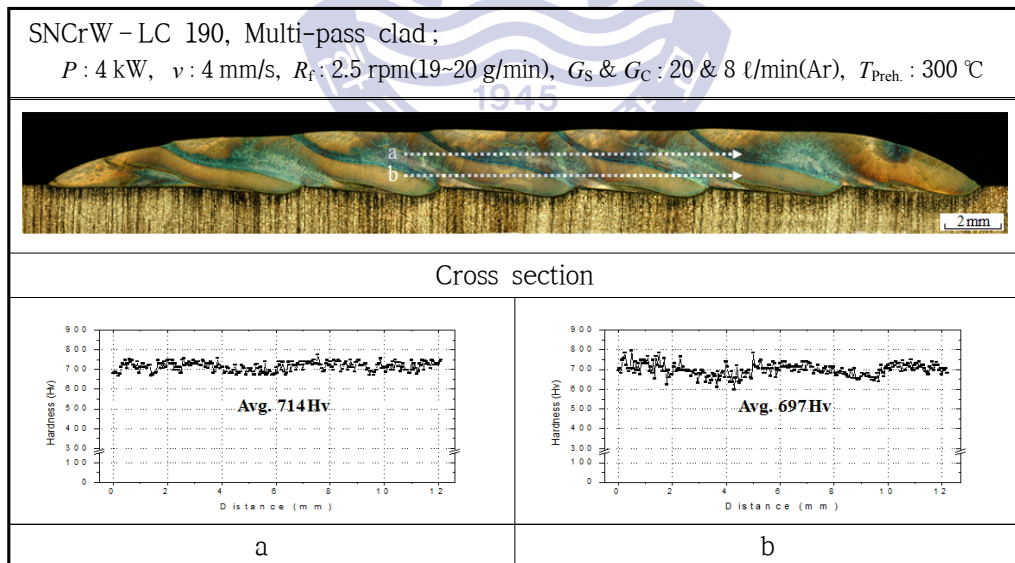


Fig. 4.93 Transverse hardness distribution of LC-190 multi-pass clad at 20 % overlapping ratio

#### 4.4.2 Stellite 6과 LC-190 클래드 층의 형상 비교

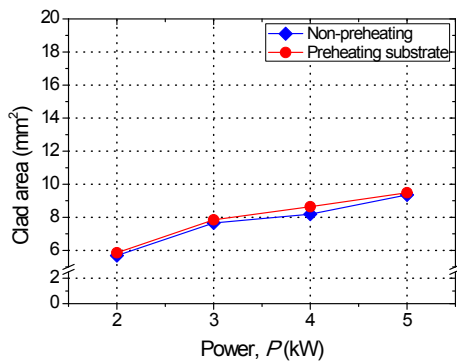
LC-190 분말은 stellite 6 분말과 동일한 코발트계 합금이지만, Table 3.3과 Table 3.4에 나타내었듯이 합금 원소 및 성분비의 차이가 있으며 그 중 W과 C의 성분량의 차이가 두드러진다. 단위 용적당 중량인 용적밀도(apparent density)는 stellite 6이  $4.6 \text{ g/cm}^3$ 에 비하여 LC-190 분말은  $5.0 \text{ g/cm}^3$ 으로 더 크기 때문에 50 g 공급 시 소요되는 시간이 stellite 6은 15초, LC-190은 13초로 LC-190 분말을 동일한 시간에 더 많이 공급할 수 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 19~20 g/min 만큼 분말을 공급할 때 판의 회전수는 LC-190은 2.5 rpm, stellite 6은 3 rpm으로 설정하였다.

Stellite 6 코팅 층의 경우 출력을 증가시킬수록 용융액의 온도가 상승하면서 표면장력이 감소하여 폭이 증가하면서 높이는 감소하는 것을 앞의 결과를 통해 확인하였다. 하지만 LC-190 클래드 층은 출력이 증가할수록 폭이 증가하였으며 높이 또한 증가하는 경향을 나타내었다. 동일한 출력 조건에서 stellite 6 클래드 층의 폭이 더 넓었으며 LC-190 층의 높이는 더 높았다. 형상 차이 외에도 LC-190 클래드 층은 stellite 6 층과 달리 표면에 균열이 발생하였다. 따라서 LC-190 클래드 층의 균열을 방지하기 위하여 모재를 300 °C로 예열하였으며 출력 변화에 따른 두 코팅 층의 면적을 비교하였다. 모재 예열유무에 따라 출력이 변화할 때 LC-190 코팅 층의 클래드 면적(clad area) 및 전체 면적(clad area + molten area) 측정 결과는 Fig. 4.94에, stellite 6 클래드 층과 모재 예열 후 형성한 LC-190 코팅 층의 클래드 면적, 전체 면적 넓이 그래프를 Fig. 4.95에 나타내었다. Fig. 4.94와 Fig. 4.95에서 출력을 제외한 나머지 공정변수는 동일한 값으로 설정하였다. 우선 예열유무에 따른 LC-190 클래드 층의 면적을 비교해보면, 2 kW의 경우 입열량이 낮아 클래드 면적과 클래드 전체 면적이 예열에 관계없이 비슷한 나타내고 있다. 하지만 모재를 예열했을 때, 빔 흡수율이 좋아져 3 kW부터 4 kW까지 출력이 증가할수록 클래드 면적이 증가하기 시작하였으며 모재 용융 면적 또한 증가하였다. 5 kW에서는 높은 입열량으로 클래드 면적이 비슷하였으나 예열 시 모재 용융부의 면적이 급격히 증가한 것을 알 수 있다.

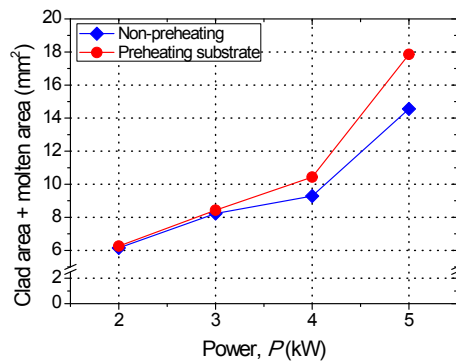
Fig. 4.95를 통해 균열이 발생하지 않은 LC-190 클래드 층과 stellite 6 층의 면적을 비교할 때, 두 종류의 분말 모두 출력이 증가할수록 용융되는 분말량이

증가하여 클래드 면적 또한 점차 증가하는 것을 알 수 있으며 동일한 출력일 때 LC-190 클래드 층의 면적이 더 넓다는 것 또한 확인할 수 있다. 공급된 분말량은 동일하지만 실제 용융되어 클래드 층으로 형성된 분말은 LC-190이 더 많다는 것을 알 수 있다. 이는 분말의 밀도 차이로 공급되는 분말의 무게가 무거우면 용융풀로부터 튕겨져 나오는 양이 감소하게 되므로 LC-190 분말의 효율이 더 높다고 사료된다. 클래드 층의 전체 면적은 출력이 증가할수록 모재의 용융량도 증가하기 때문에 클래드 면적보다 더 높은 값이었으며 증가하고 있는 것 또한 확인할 수 있다. 클래드 전체 면적 중 클래드 면적만 제외하면 모재 용융부 면적 넓이는 stellite 6에서 더 큰 값을 나타내었다. 클래드 상부 면적그래프를 통해 모든 출력조건에서 일정한 간격으로 넓이가 증가하는 stellite 6 클래드 층에 비해 LC-190 클래드 면적은 4 kW에서 5 kW로 출력이 증가할 때 다른 출력 조건에 비하여 절반 정도 적게 증가하였다. 그리고 클래드 전체 면적 또한 stellite 6 클래드 층은 일정한 간격으로 면적이 증가하였으나 LC-190 층은 4 kW까지 일정히 증가하다가 5 kW에서 급격히 상승한 것을 알 수 있다. 따라서 4 kW에서 공급되는 분말을 충분히 용융시킬 수 있으며 이 이상의 빔 에너지 공급 시 클래딩이 아닌 합금화(alloying)가 이루어진다는 것을 알 수 있다. 그러므로 LC-190 분말을 이용하여 클래딩 시, 레이저 출력이 5 kW일 때 19~20 g/min 보다 더 많은 분말량을 공급해야 한다.



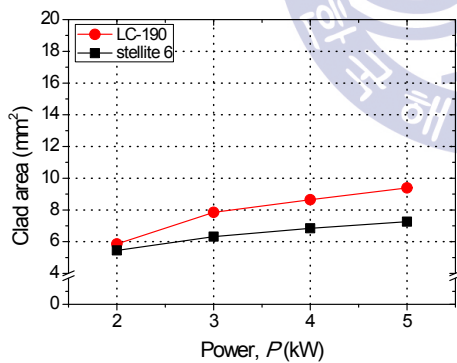


(a) Clad area

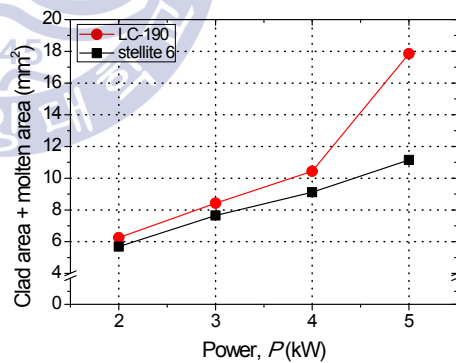


(b) Clad area + molten area

**Fig. 4.94** Comparison of LC-190 clad layer area with laser power under non-preheating and after preheating substrate to 300 °C



(a) Clad area



(b) Clad area + molten area

**Fig. 4.95** Comparison of stellite 6 and LC-190 clad layer area with laser power when LC-190 cladding is done after preheating substrate to 300 °C

## 제 5 장 결 론

기존 클래딩 기술의 문제점을 보완하고 우수한 특징을 가진 레이저 클래딩 기술의 활발한 적용을 위한 기초 연구로써 지배적인 공정변수를 정의 및 추출하여 그 변화에 따른 영향을 관찰하였다. 각 경우별로 1 패스 및 멀티 패스 클래드 층의 폭, 높이 및 결함을 비교·검토하였으며 희석률에 따른 정도 및 합금원소 농도 차이를 분석하여 그 결과를 다음에 정리한다.

1. 지배적인 공정변수인 레이저 출력과 빔 이송속도, 분말 공급량 변화에 따른 1 패스 클래드 층의 형상 및 크기는 변화였다. 레이저 출력이 증가할수록, 빔 이송속도가 감소할수록 클래드 층의 높이는 감소하고 폭은 증가하였다. 분말 공급량의 증가는 클래드 층의 폭의 길이에는 거의 영향을 미치지 않았으며 높이를 증가시켰다. 희석률의 경우에는 출력 증가, 빔 이송속도 감소 및 분말 공급량 감소와 같이 모재 입열량이 낮을 때 감소하였다.

2. 레이저 클래딩 시 실드가스 및 이송가스는 아르곤을 사용하였다. 가스 유량이 미치는 영향을 조사한 결과, 실드가스 유량 20 l/min, 이송가스 유량 8 l/min의 조건에서 적절한 클래드 층을 얻을 수 있었다.

3. 중첩률을 빔 사이즈 중심이거나 클래드 층의 폭 길이 중심일 때로 달리하여 멀티 패스 클래드 층의 특성을 파악하였으며, 그 기준을 빔 사이즈로 정해 중첩률을 정의하였다. 중첩률이 증가할수록 클래드 층의 폭은 감소, 높이는 증가하였으며 동일한 조건이 1 패스 클래드 층보다 높이가 더 높았다. 분말 공급량이 너무 높거나 입열량이 충분하지 않으면 중첩부 아래에서 기공이 발생하는 것을 확인하였다.

4. 높이가 높은 클래드 층을 형성하기 위해 분말 공급량을 증가시킬 수 있으나

이 방법은 기공이나 박리의 문제로 이어질 수 있다. 그러므로 클래드 층의 적층이 필요하며 적층 시 레이저 조사 위치와 기존에 형성된 클래드 층의 표면 온도의 영향을 파악하였다. 레이저 조사 위치를 변화시켜 형성된 클래드층의 두드러진 차이가 나타나지 않았으며 클래드 층의 표면 온도는 냉각속도에 영향을 미쳐 경도가 변하는 것을 확인하였다. 따라서 적층 시 레이저 조사 위치는 이동하지 않으며 연속적으로 클래드 층을 쌓아올렸으며 5층까지 형성했을 때 약 10 mm에 가까운 높이의 클래드 층을 형성할 수 있었다.

5. 1 패스 클래드 층의 경도를 표면에서부터 깊이 방향으로 측정한 결과, 출력이 2 kW로 낮을 때 클래드 층의 경도는 480~530 Hv로 모재 경도의 약 2.5 배 증가하였지만 출력이 증가할수록 회석률이 증가하여 경도가 점차 감소하였다. 또한 분말 공급량이 증가할 경우 클래드 층의 경도는 상승하였으며, 전체적으로 모재 경도의 2~2.5 배 이상 증가하였다.

6. 광학현미경과 전자현미경으로 1 패스 클래드 층의 미세조직을 관찰하였다. 모든 조건에서 균열이 없는 덴드라이트 형상의 미세조직이 관찰되었으며 입열량이 증가할수록 조직이 조대화되었다. 또한 EDS 라인분석을 통하여 출력이 증가하거나 분말 공급량이 감소할수록 클래드 층 전체가 회석되는 것을 확인하였다.

7. 멀티 패스 클래드 층의 경도를 종방향 및 횡방향으로 나누어 측정하였다. 종방향 경도는 첫 번째 클래드 층을 제외한 나머지 영역에서 평균 470~490 Hv 정도 측정되었으나 첫 번째 클래드 층은 약 440 Hv으로 측정되었다. 중첩률을 10 %와 20 %로 달리하여 횡방향으로 측정했을 때 20 % 중첩률에서 평균경도가 더 높게 측정되었으나 두 조건 모두 분말 특성을 잘 나타내었다. 멀티 패스 클래드 층을 적층했을 경우에도 동일한 방식으로 경도를 측정하였다. 클래드 층과 층 사이 적층되는 부분에서 경도가 감소하는 경향을 확인하였으며 적층된 클래드 층의 경도는 1층 멀티 패스 클래드 층 보다 증가하였다.

8. 광학현미경으로 멀티 패스 클래드 층의 조직을 분석한 결과, 복잡한 온도 구배 방향으로 1 패스 클래드 층 보다 더 다양한 결정성장 방향을 나타내었으며 중첩부에서는 이전에 형성된 클래드 층의 일부가 재용융 및 재가열되어 결정입자가 점점 커지는 것을 알 수 있으며 새로운 클래드 층에서부터 다시 작아지는 것을 확인하였다. 중첩 및 적층이 같이 일어난 부분에서 더욱 복잡한 결정성장 방향이 나타났으며 기존에 형성된 클래드 층도 또한 재용융 및 재응고되어 적층부에서 조직크기가 커지는 것을 확인하였다.

9. 1 패스 클래드 층의 EDS 성분 분석을 통해 입열량이 높으면 클래드 층 전체가 희석되었으나 멀티 패스에서는 중첩 진행 특성상 첫 번째 클래드 층에서만 희석이 많이 발생하고 나머지 클래드 층에서는 그렇지 않았다. 2층 및 3층까지 클래드 층을 쌓아올렸을 때도 또한 이미 형성된 클래드 층 표면위에 적층되는 것이므로 모재 성분의 직접적인 영향이 미치지 못하여 첫 번째 클래드 층에서부터 여섯번째 클래드 층까지 낮은 희석률을 나타내었다. 중첩부와 적층부의 더 정확한 분석을 위해 EPMA를 실시하였으며 그 결과, 1층의 첫 번째 클래드 층과 두 번째 클래드 층의 중첩부에 Fe 성분의 두드러지는 차이를 확인하였으며, 1층과 2층의 적층부에서는 작지만 약간의 차이가 존재하였으며 2층과 3층의 적층부에서는 그 차이가 상당히 미미하였다.

10. 동일한 Co계 합금일지라도 W와 C의 합금성분 비를 증가시킨 LC-190 분말을 이용하여 클래딩을 실시하였으며 공정변수에 따른 특성 변화를 파악하였다. 성분비가 다르기 때문에 용적밀도가 달라지며 동일한 빔 에너지를 공급하였을 때 클래드 층의 형상 및 크기가 달라졌으며 경도 분포 또한 약 200 Hv이상 증가하였다.

## 참고 문헌

1. Torims T, “The application of laser cladding to mechanical component repair, renovation and regeneration”, DAAAM INTERNATIONAL SCIENTIFIC BOOK Chapter 32 (2013), 587-608
2. Ehsan Toyserkani, Amir Khajepour, Stephen Corbin, “Laser Cladding”, CRC Press LLC (2005)
3. Adam P, Dariusz B, Andrzej Y, Bartlomiej D, Marek G, Monika K, “Laser cladding of stellite 6 on low carbon steel for repairing components in automotive application using disk laser”, Archives of Mechanical Technology and Automation vol.33 no.2 (2013), 25-34
4. Louis George Von Wielligh, “Characterizing the Influence of Process Variables in Laser Cladding Al-20wt.%Si onto an Aluminum Substrate”, Master Degree Thesis at the Nelson Mandela Metropolitan University (2008)
5. 서무천, “전남 수리 조선산업 경쟁력 분석”, 목포대학교 석사학위 논문 (2010)
6. 박형호, 김철, 두진일, “부산지역 수리조선산업의 현황과 발전방안”, 한국은행 부산본부 지역경제 조사연구자료 (2003)
7. 안성훈, 고양중, 유남현, 오병기, 김동욱, “전남지역 중소조선산업 현황과 향후 발전방안”, 한국은행 광주전남본부·목포본부 (2014)
8. Yibo Wang, Shusen Zhao, Wenyan Gao, Chunyang Zhou, Falan Liu, Xuechun Lin, “Microstructure and properties of laser cladding FeCrBSi composite powder coatings with higher Cr content”, Journal of Materials Processing Technology 214 (2014), 899-905
9. Olof Andersson and Keith Parker, “High powder diode laser cladding”, Fabricating&Metalworking (2014)
10. J. del Val, R. Comesana, F. Lusquinos, M. Boutinguiza, A. Riveiro, F. quintero, J. Pou, “Laser cladding of Co-based superalloy coatings : Comparative study between Nd:YAG laser and fibre laser”, Surface and Coatings Technology 204 (2010), 1957-1961
11. Janicki D. “HIGH POWER DIRECT DIODE LASER CLADDING OF STELLITE 6+WC COATINGS”, 9<sup>th</sup> International congress - Machines, Technologies, Materials (2012)
12. 서무홍, 이제훈, 한유희, “레이저 클래딩”, 기계와 재료 제11권 제1호(1999), 111-117
13. Marcel Schneider, “Laser cladding with powder - effect of some machining parameters on clad properties”, Ph.D. Thesis University of Twente, Enschede, The Netherlands, 1998

14. Hermann Schumann, Heinrich Oettel, “Metallografie”, WILEY-VCH, 2009
15. 편집부, “용접 접합 용어사전”, 대한용접학회, 2001
16. 대한용접접합학회, “용접 접합 편람-III 공정 및 열가공”, 대한용접학회, 2007
17. 정장식, “클래드강 화공기기 제작을 위한 오버레이 용접 표준에 관한 연구”, 울산대학교 공학석사 학위논문, 2013
18. 김종도, 김영식 공저, “알기쉬운 용접 · 접합공학”, 다솜출판사, 2012
19. 유호천, “용접방법에 따른 오버레이 용접기술의 연구동향”, 대한용접 · 접합학회지 제 31권 제 1호(2013), 11-20
20. Michel Cartier, “Handbook of Surface Treatment and Coatings”, Professional Engineering, 2002
21. 부경대학교 산학협력단, “분말 용사공정에 의한 선박용 엔진밸브 제조기술 개발”, 2009
22. 백응률, 정재영, 안상호, “오버레이용접(육성용접)의 기술개발 현황”, 대한용접 · 접합학회지 제 15권 제 5호(1997), 11-20
23. 유호천, “오버레이 용접에 있어서 용접재료에 따른 최신 연구동향”, 대한용접 · 접합학회지 제 31권 제 6호(2013), 17-26
24. Yongjun Hu, “Characetrization of dilution action in laser-induction hybrid cladding”, Optics & Laser Technology 43 (2011), 965-973
25. A. Riveiro, A. Mejias, F. Lusquinos, J. del Val, R. Comesana, J. Pardo, J. Pou, “Laser cladding of aluminium on AISI 304 stainless steel with high-power diode laers”, Surface & Coatings Technology 253 (2014), 214-220
26. J.L. Chen, J. Li, R. ong, L.L. Bai, J.Z. Shao, C.C. Qu, “Effect of the scanning speed on microstructural evolution and wear behaviors of laser cladding NiCrBSi composite coatings”, Optics & Laser Technology 72 (2015), 86-99
27. J.M. Yellup, “Laser cladding using the powder blowing technique”, Surface & Coatings Technology 71 (1995), 121-128
28. A. Weisheit, G. Backes, R. Stromeyer, A. Gasser, K. Wissenbach, R. Poprawe, “Powder Injection : The Key to Reconditioning and Generating Components Using Laser Cladding”, International Congress on Advanced Materials, their Processes and Applications (2001)
29. Olof Andersson and Keith Parker, “High powder diode laser cladding”, Fabricating & Metalworking (2014)
30. 강남현, 유연곤, “레이저클래딩 기술(오버레이 용접법)”, 대한용접 · 접합학회지 제 25권 제1호(2007), 7-8
31. 송순달, “레이저의 기초원리와 응용”, 청문각, 1999
32. 김병태, “레이저 공학”, 상학당, 2004
33. John F. Ready, “레이저 응용”, 청문각, 2005



34. 김희제, “다양한 레이저 활용”, 인터뷰전, 2006
35. ORAZIO SVELTO, “Principles of Lasers”, Kluwer Academic Publishers, 2002
36. 이수진, “고출력 다이오드 레이저를 이용한 질화규소세라믹의 레이저 예열선삭에 관한 연구”, 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 2010
37. 송무근, “고출력 다이오드 레이저를 이용한 프레스 금형재료용 주철의 표면경화처리  
리에 관한 연구”, 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 2010
38. Zhenfei Hu, “Heat resistance steels, microstructure evolution and life assessment  
in power plants”, Thermal Power Plants
39. A. Zielinski, H. Smolenska, W. Serbinski, W. Konczewicz, A. Klimpel, “Characterization  
of Co-base layers obtained by laser cladding technique”, 13th International Scientific  
Conference on Achievements in Mechanical and Materials Engineering (2005), 723-726
40. Fang Liu, Changsheng Liu, Suiyuan Chen, Xingqi Tao, Yong Zhang, “Laser  
cladding Ni-Co duplex coating on copper substrate”, Optics and Laser in  
Engineering 48 (2010), 792-799
41. H. Smolenska, “Oxidation and exhaust gas corrosion resistance of the cobalt base  
clad layers”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering  
Vol. 31 no. 2 (2008), 364-372
42. Steen, W. M., “Laser Material Processing”, Springer, 1997
43. Chunyang Zhou, Shusen Zhao, Yibo Wang, Falan Liu, Wenyan Gao and Xuechun  
Lin, “Mitigation of pores generation at overlapping zone during laser cladding”,  
Journal of Material Processing Technology 216 (2015), 369-374
44. Wenyan Gao, Shusen Zhao, Yibo Wang, Falan Liu, Chunyang Zhou, Xuechun Lin,  
“Effect of re-melting on the cladding coating of Fe-based composite powder”,  
Materials and Design 64 (2014), 490-496
45. Kaibin Li, Dong Li, Dongyu Liu, Guangyu Pei, Lei Sun, “Microstructure evolution  
and mechanical properties of multiple-layer laser cladding coating of 308L  
stainless steel”, Applied Surface Science 340 (2015), 143-150
46. 이창민, “Laser cladding시 발생하는 crack 생성 및 전파 거동에 관한 연구”, 한양  
대학교 공학석사 학위논문, 2014
47. 이창민, 박형권, 이창희, “레이저 클래딩 공정 조건이 코발트 합금-텅스텐 카바이드 혼  
합 코팅층의 균열 발생에 미치는 영향”, 대한용접·접합학회지 제 32권 제6호(2014),  
41-46
48. Joe Bundy, “Understanding Weld Cracking”, Welding Journal 88(9) (2009), 30-32
49. Parisa Farahmand, Radovan Kovacevic, “An experimental-numerical investigation  
of heat distribution and stress field in single-and multi-track laser cladding by a  
high-power direct diode laser”, Optics & Laser Technology 63 (2014), 154-168

# 연구 성과

## 1. 연구논문

- (1) “The study on Laser Cladding of Heat Resisting Steel with Stellite 6 Powder (I)-The Characteristics of One-pass Clad Layer with Parameter” , *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 2016 (등재 예정)
- (2) “The study on Laser Cladding of Heat Resisting Steel with Stellite 6 Powder (II)-The Chemical Composition in Multi-pass Clad” , *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 2016 (등재 예정)
- (3) “The study on Laser Cladding of Heat Resisting Steel with Stellite 6 Powder (III)-Effect of Layer Number of Clad” , *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 2016 (등재 예정)
- (4) “The study on Laser Cladding of Heat Resisting Steel with Stellite 6 Powder (IV)-Comparison of the Characteristics of Stellite 6 and LC-190 Clad” , *Journal of the Korean Welding and Joining Society*, 2016 (등재 예정)

## 2. 학술대회

- (1) J.D.Kim, J.H.Lee, M.K.Song, Y.S.Cho and E.J.Lee, “A Study on Surface Hardening Treatment for Screw Type of Round Bar Using High Power Diode Laser” , *Abstracts of the 2011 Autumn Annual Meeting of the Korean Welding and Joining Society*, Vol.56, pp.67, 2011
- (2) J.D.Kim, G.H.Myung, M.K.Song, E.J.Lee and J.H.Oh, “Comparison of Arc Welding Mode for Hybrid Welding of SS400 Steel” , *Proceedings of the 37th KOSME Fall Conference*, pp.154, 2013
- (3) J.D.Kim, M.K.Song, G.H.Myung, E.J.Lee and S.E.Lee, “Comparison of Hardening Characteristics According to Laser Power and Temperature Control during Laser Surface Heat Treatment of Die Materials” , *Proceedings of the KSME 2014 Spring Annual Meeting*, pp.275-276, 2014
- (4) J.D.Kim, E.J.Lee, J.Suh, I.D.Park, C.G.Kim and S.D.Kong, “Fundamental Study on Laser Cladding of Stellite 6 Powder and SNCrW Substrate for Re-engineering of Marine Diesel Engine Exhaust Valve(I)-Effect of Parameter on Characteristics of One-pass Clad Layer” , *Abstracts of the 2015 Spring Conference of the Korean Welding and Joining Society*, Vol.62, pp.77, 2015

- (5) J.D.Kim, E.J.Lee, C.G.Kim, J.Suh and I.D.Park, “The Characteristics of Clad Layer with Laser Power and Traveling Speed during Diode Laser Cladding for Re-engineering” , *Spring Annual Proceeding of Korean Society of Laser Processing*, pp.30-31, 2015
- (6) J.D.Kim, E.J.Lee, C.G.Kim, S.J.Lee, S.D.Kong and J.Suh, “Fundamental Study on Laser Cladding of Stellite 6 Powder and SNCrW Substrate for Re-engineering of Marine Diesel Engine Exhaust Valve(II)-The Characteristics of Clad Layer with Overlapping Ratio” , *Abstracts of the 2015 Autumn Annual Meeting of the Korean Welding and Joining Society*, Vol.63, pp.71, 2015
- (7) J.S.Kim, J.D.Kim, M.K.Song, S.H.Park, E.J.Lee and .W.Kim, “A Study on the Waveform Control for Reducing the Crater Crack in Fiber Laser Welding of Pure Titanium Sheet” , pp.149, 2015



## 감사의 글

1학기, 2학기... 시간이 흐를수록 졸업이라는 단어가 멀게만 느껴진 저에게도 2년이라는 시간이 지나 곧 졸업을 하게 되었습니다. 되돌아보니 대학원 생활동안 스스로의 부족함 때문에 많이 울기도, 힘들기도 했습니다. 하지만 그로인해 제 자신이 변화하고 발전할 수 있었다고 믿으며 이 시기가 오기까지 여러모로 많은 조언과 도움을 주신 분들께 감사의 인사를 전합니다.

먼저, 대학원이라는 새로운 길을 안내해주시고 지도와 연구에 있어서 누구보다 더욱 열정적이신 김종도 지도교수님께 감사드립니다. 삶을 살아가는 데 있어서 교수님의 아낌없는 충고로 많은 것을 배울 수 있었습니다. 바쁘신 와중에도 논문을 지도 및 심사해주시고 항상 온화한 미소로 격려를 아끼시지 않는 이명훈 교수님과 부족한 제 논문을 심사해주신 문경만 교수님께도 감사의 인사를 전합니다.

다음으로 저희 실험실에서 제게 많은 도움을 주신 능력자 실장님 무근이오빠, 더욱 바빠지게 될 무한공정 지성이오빠, 정말 새로운 시작을 앞 둔 수한이오빠에게 고마운 마음을 전합니다. 그리고 인생과 학업에 있어서 아낌없이 조언을 해주신 오재환, 김평수, 문찬희, 오상진, 석종민, 이정환, 광명섭, 김태훈 선배님께도 정말 감사드립니다. 고민이 생길 때마다 적절한 답을 알려주시는 똑똑한 창제오빠, 레이저 센터에서 열심히 일하고 계시는 멋진 커리어우먼 수진이 언니와 소영이 언니, 낯선 서울에서 열심히 돈 벌고 있을 알다가도 모를 기훈이오빠에게도 감사드립니다.

표면공학실험실의 항상 바쁘고 열심히 하시는 준무오빠, 재욱이오빠, 늘 노력하는 성화오빠, 새로운 시작을 맞이한 한빈이오빠, 너무 유쾌하시고 다정다감한 조규장 선배님께도 감사의 인사를 전합니다. 과제를 진행하면서 많은 도움을 주신 종합폴스타의 김철규 사장님, 최진수 차장님과 한국유텍의 황우식 이사님, 공성도 차장님께도 감사의 말씀을 전합니다.

학부시절부터 현재까지 나의 즐거움이자 힘이 되어준 소중한 친구 선정이와 정희, 가장 힘들 때 옆에서 위로하고 응원해준 세상에서 가장 착한 수정이, 항상 보고 싶고 대구에서 착실히 자신의 꿈을 키워나가고 있는 주현이, 학부 때부터 저를 예뻐해주시고 챙겨주시며 친언니와 다름없는 아영이 언니에게도 감사드립니다.

마지막으로 내가 존경할 수 있고 꿈을 이루기 위해 열심히 노력하는 정현이오빠, 세상에서 가장 소중하며 못난 딸을 열심히 키우신다고 고생하신 우리 엄마, 아빠, 스스로 자신의 삶을 완성해가고 있는 예쁜 동생 은솔이에게 고맙고 사랑한다는 말을 전합니다.

더욱 성장하고 발전하기 위해 앞으로 최선을 다하는 삶을 살도록 노력하겠습니다. 감사합니다.